

Titre: Analyse de la consommation énergétique de véhicules électriques
Title:

Auteur: Élisabeth Bouchard
Author:

Date: 2018

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Bouchard, É. (2018). Analyse de la consommation énergétique de véhicules électriques [Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie.
Citation: <https://publications.polymtl.ca/3297/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/3297/>
PolyPublie URL:

Directeurs de recherche: Catherine Morency
Advisors:

Programme: Génie civil
Program:

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ANALYSE DE LA CONSOMMATION ÉNERGÉTIQUE DE VÉHICULES ÉLECTRIQUES

ÉLISABETH BOUCHARD

DÉPARTEMENT DES GÉNIES CIVIL, GÉOLOGIQUE ET DES MINES

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION

DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES

(GÉNIE CIVIL)

AOÛT 2018

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

ANALYSE DE LA CONSOMMATION ÉNERGÉTIQUE DE VÉHICULES ÉLECTRIQUES

présenté par : BOUCHARD Élisabeth

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. TRÉPANIÉ Martin, Ph. D., président

Mme MORENCY Catherine, Ph. D., membre et directrice de recherche

M. BOIVIN Simon, M.Sc.A, membre

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, je tiens à remercier ma mère, Céline, pour son soutien et ses encouragements tout au long de mon parcours scolaire. Elle a cru en moi du début jusqu'à la fin et a toujours réussi à trouver les bons mots pour me réconforter lors des périodes plus difficiles. Je tiens à remercier aussi mon copain, Ian, avec qui je vis depuis le commencement de mes études à Polytechnique, pour son support exceptionnel, sa compréhension et surtout sa patience. Les bons moments que nous avons passé ensemble, en voyages, autour d'un bon repas ou même lors de différentes activités sportives n'ont tout simplement pas de prix. Ces précieux moments sont gravés à tout jamais dans ma mémoire et ils m'ont permis de toujours garder la tête haute. J'aimerais aussi remercier mon frère, Gaby, ma grand-mère et mon grand-père simplement pour leur présence. Je sais qu'ils sont fiers de moi et cette fierté me donne cette envie et le courage d'aller toujours plus loin.

Je dois remercier l'équipe de travail du restaurant Ôzeu. Ils m'ont accompagné tout au long de mon parcours à Poly et ils m'ont beaucoup apporté au niveau relationnel. Mon patron, Georges, a su être compréhensif lorsque j'étais débordée par les travaux, lorsque j'avais besoin de temps pour respirer et lorsque j'avais besoin de travailler pour me changer les idées. Suzanne, Marie-Pier et Éric plus particulièrement ont été des collègues de travail exceptionnels que je n'oublierai jamais.

Il est important pour moi de mentionner l'aide et le support de Pegah Nouri, qui a pris de son temps personnel pour m'aider dans le développement des cycles de conduite et qui a pris la peine de me rencontrer à quelques reprises. Cette aide précieuse m'a permis d'avancer plus rapidement dans mon projet de recherche.

J'ai suivi mon premier cours dans le domaine du transport au baccalauréat à Polytechnique sous la supervision de Hubert Verreault. Je tiens à le remercier puisque cette personne m'a transmis sa passion pour le transport et m'a aussi donné la chance, quelques années plus tard, de travailler avec lui pour le cours de projet intégrateur de 3^e année en génie civil. Cette grande opportunité m'a permis d'en apprendre davantage au niveau du transport et de l'enseignement.

Finalement, je n'aurais pas accompli toutes ces belles choses sans le soutien et la confiance de Catherine Morency. Je désire la remercier du plus profond de mon cœur pour son accueil au sein de son équipe de recherche, pour ses précieux conseils et sa patience. Cette femme exceptionnelle a été et restera un modèle pour une jeune femme comme moi.

Je dois absolument remercier Taxelco puisque sans l'accès aux données provenant des véhicules de Téo Taxi, cette recherche n'aurait pas pu être possible.

RÉSUMÉ

La majorité des analyses de consommation énergétique, autant au niveau des véhicules conventionnels que des véhicules électriques, se basent sur des cycles de conduite. Les cycles de conduite permettent de représenter différents comportements de conduite dans diverses conditions. Or, l'une des plus grandes lacunes dans l'élaboration des cycles de conduite est la faible disponibilité de données réelles. Les cycles de conduite présents dans la littérature ont pour limitations le nombre de journées d'enregistrements, le nombre de véhicules utilisés ainsi que le nombre de chauffeurs différents qui participent à l'étude. Ces limitations peuvent facilement entraîner des biais dans les résultats puisque l'objectif principal du développement d'un cycle de conduite est de représenter de façon générale les comportements de conduite de la population, et non d'un type de personne en particulier. Certains modèles de consommation énergétique disponibles dans la littérature ne sont pas affectés par ces limitations, mais sont alimentés par des données qui ne proviennent pas du Québec. Or, il est reconnu que les comportements de conduite sont différents pour chaque ville et les caractéristiques environnementales, comme la température ambiante, ont un impact direct sur la consommation énergétique pour tous les types de véhicules.

Dans le cas présent, les données utilisées pour le développement des cycles de conduite, sur lesquels les modèles de consommation énergétique se basent, proviennent de l'entreprise montréalaise Taxelco qui gère notamment le service de transport Téo Taxi, une compagnie de taxis entièrement électriques, installée à Montréal depuis novembre 2015. Seules les données provenant de systèmes embarqués à bord des véhicules de Téo Taxi ont été utilisées pour cette étude puisque la recherche se concentre sur la consommation énergétique des véhicules électriques dans un milieu urbain. La compréhension de la consommation énergétique au travers différents modèles permettra d'éclairer les chauffeurs de Téo Taxi au niveau de leur choix d'itinéraire afin d'optimiser leur chargement de batterie au travers leur journée d'opération. De plus, des modèles de consommation énergétique permettront éventuellement de développer un calculateur de chemin à consommation minimale pour les déplacements à bord d'un véhicule électrique à Montréal.

La réalisation du projet implique la mise en place d'une procédure de traitement automatisé des données de GPS issues de systèmes embarqués à bord des véhicules de Téo Taxi, le développement d'une méthode de création de cycles de conduite (qui alimentent les modèles de consommation énergétique des véhicules), la création de typologie de segments routiers basés sur les différences

potentielles des cycles de conduite déduits et le développement de modèles de consommation énergétique pour les véhicules électriques. Ultimement, tous les objectifs énumérés précédemment permettront d'adapter un algorithme de calcul de chemin à consommation minimale pour les véhicules électriques à Montréal. Ce calculateur de chemin permettra aux chauffeurs de Téo Taxi de faire des choix éclairés au niveau de l'itinéraire choisi afin de minimiser leur consommation d'énergie.

Le premier chapitre permet d'introduire le sujet de recherche. La problématique y est présentée, suivie par les objectifs de ce projet de recherche. Le chapitre suivant présente une revue de littérature divisées en cinq sujets qui permettent de bien comprendre les différents aspects de la recherche et les enjeux qui en découlent : la relation entre les émissions de gaz à effet de serre et le transport routier au niveau mondial et au Québec, les véhicules électriques, les cycles de conduite et les modèles de consommation énergétique.

Le troisième chapitre, qui porte sur la méthodologie, présente toutes les étapes permettant d'atteindre les objectifs de la recherche. Au départ, les données brutes utilisées sont présentées ainsi que toutes les étapes menant au traitement de données automatisé et de leurs utilités respectives. Suite à certaines hypothèses posées, une segmentation de la base de données est ensuite effectuée. Cette segmentation permet d'analyser s'il y a des différences potentielles au niveau du comportement de conduite selon différents facteurs spatiaux et temporels. Ces différences comportementales se traduisent par des différences au niveau des cycles de conduite et tout le processus permettant le développement de cycles de conduite y est présenté. La segmentation des données s'est fait au niveau du type de segment routier emprunté (rue résidentielle, artère principale et autoroute), de la journée du déplacement (lundi, mercredi, vendredi et dimanche) et de l'heure à laquelle le déplacement s'est effectué (de 5h00 à 20h00 et à minuit). Des hypothèses portant des différences de comportements de conduite et de consommation énergétique en fonction de la segmentation sont proposées. Ce chapitre termine sur la procédure suivie afin d'estimer la consommation énergétique des véhicules électriques.

La chapitre 4 présente les résultats obtenus suite aux sujets abordés lors de la méthodologie. Les différences au niveau du comportement de conduite en fonction de la segmentation effectuée ne sont pas toutes significatives, mais elles ont tout de même en majeure partie un impact sur la consommation énergétique estimée des véhicules électriques. Il y a des différences statistiquement

significatives de consommation énergétique en fonction du type de segment routier emprunté et en fonction de certaines journées à l'étude. La consommation énergétique présente aussi des tendances en fonction du type de segment routier emprunté, du jour de la semaine et des heures à l'étude.

Pour conclure, l'étude des comportements de conduite amène une meilleure compréhension des enjeux liés à la consommation énergétique des véhicules électriques. Les analyses effectuées dans le cadre de cette recherche vont permettre d'alimenter le développement d'un calculateur de chemin à consommation minimale et pourrait soutenir des analyses de positionnement stratégique de bornes de recharge. De plus, la segmentation routière, journalière et horaire proposée dans ce projet de recherche est une première au niveau de l'étude des comportements de conduite et de la consommation énergétique des véhicules électriques. L'accès aux données GPS des véhicules de Téo Taxi a permis de restreindre les principales limitations qui se retrouvent dans la majorité des études qui ont été publiées sur le sujet : le nombre limité de données GPS, de chauffeurs différents, de journées et d'heures à l'étude ainsi que de véhicules électriques en fonction.

ABSTRACT

Most of the studies on energy consumption estimation for conventional and electric vehicles are based on driving cycles. These driving cycles aim to represent typical driving behaviors in different situations. One of the biggest gaps in driving cycle elaborations is the limited availability of realistic data. Most of the studies reveal that the main limitations are the amounts of recording days and the number of different vehicles or drivers. These limitations can result in biases and mistakes in the proper assessment because driving cycles should primarily represent general driving behaviors rather than one particular person surrounded by specific conditions with one type of vehicle. Some energy consumption models in literature are not affected by these limitations, however they are fed by data that comes from outside of Quebec and literature has confirmed that each city should have their own driving cycles. Local regulations, road structures, climate and geography are a few factors that directly impact driving behaviors and directly impact the energy consumption of these electric vehicles.

For this case study, the data used for the development of driving cycles is provided by Taxelco, a Montreal based taxi company who manages the Téo Taxi transport services, which is an entirely electric taxi fleet company fully based in Montreal since November 2015. The only data used for this study is the one provided by the on-board systems in Téo Taxi vehicles since the researching is concentrated on energy consumption of electric vehicles within an urban environment. On-board system gives information on vehicle's position in real-time. Properly understanding the energy consumption of electric vehicle with energy consumption models can be very helpful for drivers to choose the best itinerary in order to optimize their battery charging. These energy consumption models will make it easier to supply a minimum consumption path calculator for trips in electric vehicles in Montreal.

The realization of the project implies the establishment of a procedure of automated processing of the GPS data resulting from an on-board system on Téo Taxi vehicles, the development of a method of creating a driving cycle that feeds the models of energy consumption of electric vehicles, the creation of road segment typology based on the potential difference of driving cycles deduced and the development of energy consumption models for electric vehicles. Ultimately, all the objectives listed above will make it possible to adapt a minimum fuel path calculation algorithm for electric

vehicles in Montreal. This path calculator will allow the Téo Taxi drivers to make informed choices on the chosen routes to minimize their energy consumption.

The first chapter allows the introduction of the objective of this research as well as the problematic itself. The second chapter presents a literature review composed of five main subjects which will bring a better understanding of each different aspect and the issues caused: the relation between road transportation and Green GasHouses (GHG) emissions in Quebec and on a global level, electric vehicles, driving cycles and energy consumption models.

The third chapter, which is about methodology, presents all the steps allowing to achieve the objectives of this research. At the beginning, the raw data that is used is presented as well as all the steps followed to be able to standardize, clean and set up the data in the presented database. Following certain hypotheses, a segmentation of the database is done, which then allows spatial and temporal analysis of driving behaviors. This segmentation allows us to analyze if there are potential differences in driving behavior according to different spatial and temporal factors. These behavioral differences in driving behavior illustrate themselves with driving cycles and the whole process to develop driving cycles is also presented. The following data segmentation has been done: road type (residential, arterial and highway), driving day (Monday, Wednesday, Friday and Sunday) and specific driving time (from 5 am to 8 pm and at midnight, with one-hour intervals). Assumptions for different types of driving behaviors and energy consumption patterns according to the segmentation are also proposed. This chapter concludes the followed process in order to estimate the energy consumption of electric vehicles.

The fourth chapter presents the results obtained from the topics covered in the methodology. The differences in driving behavior according to the segmentation performed are not all significant, but they are still mostly an impact on the estimated energy consumption of electric vehicles. There are some statistically significant differences of energy consumption according to the type of road used and according to which day. Energy consumption also presents some tendencies according to the type of road, type of day and hour of usage within study.

To conclude, the study of driving behaviors leads to a better analysis and understanding of the issues related to the energy consumption of electric vehicles. The analysis carried out as a part of this research will help contribute to fuel the development of a minimum consumption path

calculator and could support further analysis of strategic positioning of charging stations infrastructures for electric and hybrid rechargeable vehicles. In addition, the daily road segmentation and the proposed schedule in this research project is a first in the studies of driving behaviors and energy consumption of electric vehicles. Access to the electric vehicles GPS data from Teo Taxi has restricted the main limitations found in most studies that have been published on the subject: limited amount of GPS data, different drivers, limited amount of days and times studied as well as the used electric vehicles.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	III
RÉSUMÉ	V
ABSTRACT.....	VIII
TABLE DES MATIÈRES	XI
LISTE DES TABLEAUX.....	XV
LISTE DES FIGURES	XIX
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	XXIII
LISTE DES ANNEXES	XXIV
CHAPITRE 1 INTRODUCTION	1
1.1 Problématique	3
1.2 Objectifs.....	4
1.3 Plan du mémoire	6
CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE.....	8
2.1 Émissions de GES au niveau mondial	8
2.1.1 Aperçu global.....	8
2.1.2 Le transport routier au niveau mondial.....	9
2.2 Contexte québécois	10
2.2.1 Émissions de GES.....	10
2.2.2 Le transport routier au Québec	11
2.2.3 L'électricité québécoise	12
2.3 Les véhicules électriques	14
2.4 Les cycles de conduite	16
2.4.1 Les différents types de cycles de conduite.....	16

2.4.2	Méthode générale pour le développement de cycles de conduite.....	17
2.4.3	Travaux récents.....	21
2.5	Modèles de consommation énergétique.....	22
2.5.1	Facteurs qui influencent la consommation énergétique.....	22
2.5.2	Différents modèles de consommation énergétique.....	29
2.6	Conclusion	30
CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE.....		31
3.1	Traitement de données automatisé des enregistrements GPS.....	32
3.1.1	Données brutes.....	32
3.1.2	L'identifiant unique de la course	34
3.1.3	Durée, distance, vitesse et accélération.....	35
3.1.4	Interpolation des données	35
3.1.5	Lissage	39
3.1.6	Imposition d'arrêts	43
3.1.7	<i>Map matching</i>	44
3.2	Développement des cycles de conduite	44
3.2.1	Génération de micro-segments	45
3.2.2	Classification des micro-segments.....	46
3.2.3	Sélection des critères d'évaluation.....	55
3.2.4	Le développement des cycles de conduite	56
3.3	Traitement de données pour les données de consommation énergétique	60
3.3.1	Données brutes.....	60
3.3.2	Croisement entre les données de consommation et les données GPS	62
3.4	Estimation de la consommation énergétique des véhicules électriques.....	65

3.4.1	Les paramètres fixes	65
3.4.2	Les paramètres variables.....	67
3.4.3	Efficacité du moteur électrique, de la transmission et des freins régénératifs.....	67
3.4.4	Procédure automatisée	68
3.5	Validation de la consommation sur un secteur précis et sur un sous-ensemble de segments routiers	70
3.5.1	Secteur à l'étude.....	70
3.5.2	Sous-ensemble de segments routiers	72
3.5.3	Traitement de données automatisé pour la sélection des courses	73
3.5.4	Traitement de données automatisé dans R pour estimer la consommation énergétique.....	75
CHAPITRE 4	RÉSULTATS	76
4.1	Les cycles de conduite développés	76
4.1.1	Illustration globale de différents comportements de conduite.....	76
4.2	Consommation énergétique estimée pour les différents cycles de conduite.....	91
4.2.1	Impacts du type de segment routier emprunté sur la consommation énergétique .	91
4.2.2	Impacts du jour de la semaine sur la consommation énergétique.....	92
4.2.3	Impacts de l'heure de départ du déplacement sur la consommation énergétique..	93
4.2.4	Impacts de la combinaison des différentes segmentations sur la consommation énergétique.....	94
4.2.5	Validation des hypothèses.....	101
4.3	Consommation énergétique estimée versus rapportée.....	103
4.4	Consommation énergétique estimée des portions de courses effectuées dans le secteur à l'étude et au sein du sous-ensemble de segments routiers.....	104
4.4.1	Journées et heures représentatives	114

4.4.2	Comparaison entre les valeurs brutes et les valeurs interpolées et lissées.....	118
CHAPITRE 5 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS.....		121
5.1	Synthèse	121
5.2	Contributions	122
5.3	Limitations	123
5.4	Perspectives de recherche	125
BIBLIOGRAPHIE		127
ANNEXES		132

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2-1 : Émissions de GES du transport routier au Québec en 1990 et 2015	11
Tableau 3-1 : Données brutes de la base de données fournie par Taxelco	32
Tableau 3-2 : Exemple de la fréquence d'enregistrement des données GPS	37
Tableau 3-3 : Classes de vitesses pour les vclusters	51
Tableau 3-4 : Classes d'accélération pour les aclusters	51
Tableau 3-5 : Matrice SAFD du mercredi à 5h00 sur artère principale.....	51
Tableau 3-6 : Matrice SAFD du mercredi à 9h00 sur artère principale.....	52
Tableau 3-7 : Critères d'évaluation	55
Tableau 3-8 : Probabilité que différentes situations surviennent en succession (chaînes de Markov)	57
Tableau 3-9 : Champs présents dans la base de données de consommation énergétique.....	61
Tableau 3-10 : Valeurs des données de consommation, des données GPS croisées et de la différence entre les deux	64
Tableau 3-11 : Valeurs utilisées pour la masse et l'aire frontale des différents modèles de véhicules	66
Tableau 3-12 : Courses retenues qui ont été effectuées dans les secteurs à l'étude	74
Tableau 4-1 : Paramètres calculés pour les cycles de conduite représentant le comportement de conduite sur autoroute un mercredi à 5h00 et à 16h00	78
Tableau 4-2 : Paramètres calculés pour les cycles de conduite développés le dimanche à 9h00 sur les trois types de segments routiers.....	82
Tableau 4-3 : Moyenne des paramètres calculés issus de tous les cycles de conduite développés en fonction du type de segment routier.....	83
Tableau 4-4 : Moyenne et écart-type des paramètres calculés issus de tous les cycles de conduite développés sur rue résidentielle en fonction du type de jour.....	84

Tableau 4-5 : Moyenne et écart-type des paramètres calculés issus de tous les cycles de conduite développés sur artère principale en fonction du type de jour	85
Tableau 4-6 : Moyenne et écart-type des paramètres calculés issus de tous les cycles de conduite développés sur autoroute en fonction du type de jour	86
Tableau 4-7 : Valeurs-p pour évaluer la différences entre différents paramètres sur autoroute....	87
Tableau 4-8 : Vitesse moyenne et nombre moyen d'accélération-décélération issus des cycles de conduite développés sur rue résidentielle en fonction du type de jour et de l'heure.....	88
Tableau 4-9 : Vitesse moyenne et nombre moyen d'accélération-décélération issus des cycles de conduite développés sur artère principale en fonction du type de jour et de l'heure	89
Tableau 4-10 : Vitesse moyenne et nombre moyen d'accélération-décélération issus des cycles de conduite développés sur autoroute en fonction du type de jour et de l'heure	90
Tableau 4-11 : Valeurs-p pour évaluer la différence entre les journées à l'étude en fonction des types de segments routiers	95
Tableau 4-12 : Estimation de la consommation énergétique vs celle rapportée.....	103
Tableau 4-13 : Valeurs erronées extrêmes.....	112
Tableau 4-14 : Valeur-p suite au test de Student sur rue résidentielle.....	115
Tableau 4-15 : Valeur-p suite au test de Student sur artère principale	116
Tableau 4-16 : Valeur-p suite au test de Student sur autoroute	116
Tableau 4-17 : Valeur-p suite au test de Student sur les portions de courses la nuit.....	118
Tableau A - 1 : Courses retenues pour le développement des cycles de conduite le lundi sur rue résidentielle	132
Tableau A - 2 : Courses retenues pour le développement des cycles de conduite le mercredi sur rue résidentielle	133
Tableau A - 3 : Courses retenues pour le développement des cycles de conduite le vendredi sur rue résidentielle	134

Tableau A - 4 : Courses retenues pour le développement des cycles de conduite le dimanche sur rue résidentielle.....	135
Tableau A - 5 : Courses retenues pour le développement des cycles de conduite le lundi sur artère principale.....	136
Tableau A - 6 : Courses retenues pour le développement des cycles de conduite le mercredi sur artère principale	137
Tableau A - 7 : Courses retenues pour le développement des cycles de conduite le vendredi sur artère principale	138
Tableau A - 8 : Courses retenues pour le développement des cycles de conduite le dimanche sur artère principale	139
Tableau A - 9 : Courses retenues pour le développement des cycles de conduite le lundi sur autoroute	140
Tableau A - 10 : Courses retenues pour le développement des cycles de conduite le mercredi sur autoroute	141
Tableau A - 11 : Courses retenues pour le développement des cycles de conduite le vendredi sur autoroute	142
Tableau A - 12 : Courses retenues pour le développement des cycles de conduite le dimanche sur autoroute	143
Tableau B - 1 : Paramètres calculés pour les cycles de conduite le lundi sur rue résidentielle...	144
Tableau B - 2 : Paramètres calculés pour les cycles de conduite le mercredi sur rue résidentielle	145
Tableau B - 3 : Paramètres calculés pour les cycles de conduite le vendredi sur rue résidentielle	146
Tableau B - 4 : Paramètres calculés pour les cycles de conduite le dimanche sur rue résidentielle	147
Tableau B - 5 : Paramètres calculés pour les cycles de conduite le lundi sur artère principale ..	148

Tableau B - 6 : Paramètres calculés pour les cycles de conduite le mercredi sur artère principale	149
Tableau B - 7 : Paramètres calculés pour le cycle de conduite le vendredi sur artère principale	150
Tableau B - 8 : Paramètres calculés pour le cycle de conduite le dimanche sur artère principale	151
Tableau B - 9 : Paramètres calculé pour le cycle de conduite le lundi sur autoroute	152
Tableau B - 10 : Paramètres calculés pour le cycle de conduite le mercredi sur autoroute.....	153
Tableau B - 11 : Paramètres calculés pour le cycle de conduite le vendredi sur autoroute.....	154
Tableau B - 12 : Paramètres calculés pour le cycle de conduite le dimanche sur autoroute	155

LISTE DES FIGURES

Figure 1-1 : Schéma méthodologique	7
Figure 2-1 : Émissions mondiales de CO ₂ par secteur.....	9
Figure 2-2 : Répartition des émissions de GES au Québec, en 2015, par secteur d'activité	10
Figure 2-3 : Répartition des émissions de GES au Québec, en 2015, par type de gaz	10
Figure 2-4 : Émissions de GES des différentes filières de production électrique	12
Figure 2-5 : Comparaison des émissions de GES liées au secteur de l'électricité en 2015.....	13
Figure 2-6 : Taux de pénétration des véhicules électriques par pays d'Europe en 2016.....	15
Figure 2-7 : Facteurs au niveau de la technologie du véhicule et du type de déplacement qui influencent la consommation énergétique	27
Figure 2-8 : Facteurs au niveau de l'environnement artificiel qui influencent la consommation énergétique.....	27
Figure 2-9 : Facteurs au niveau de l'environnement naturel qui influencent la consommation énergétique.....	28
Figure 2-10 : Facteurs au niveau des mesures et du conducteur qui influencent la consommation énergétique.....	29
Figure 3-1 : Division de la table mère en tables filles	34
Figure 3-2 : Distribution fréquentielle des intervalles de temps entre deux enregistrements.....	36
Figure 3-3 : Illustration des points interpolés sur QGIS.....	38
Figure 3-4 : Poids à accorder aux valeurs en fonction de l'amplitude choisie.....	42
Figure 3-5 : Différence entre les valeurs de vitesses brutes et celles lissées et interpolées.....	43
Figure 3-6 : Représentation des micro-segments sur une portion de course	45
Figure 3-7 : Résumé des segmentations de données pour la construction des cycles de conduite	48
Figure 3-8 : Procédure automatisée pour l'échantillon de courses sur l'autoroute.....	50

Figure 3-9 : Représentation graphique des valeurs de la matrice SAFD du mercredi à 5h00 sur artère principale	52
Figure 3-10 : Représentation graphique de la matrice SAFD du mercredi à 9h00 sur artère principale.....	53
Figure 3-11 : SAFD de la classe 1	54
Figure 3-12 : SAFD de la classe 3	54
Figure 3-13 : SAFD de la classe 7	54
Figure 3-14 : Probabilités que certaines classes précèdent ou suivent la classe 2	58
Figure 3-15 : Résumé du mécanisme de développement des cycles de conduite.....	59
Figure 3-16 : Processus de sélection des activités reportées.....	63
Figure 3-17 : Exemple de l'outil développé dans Excel pour le calcul de la consommation énergétique.....	68
Figure 3-18 : Portion d'un profil de vitesse.....	69
Figure 3-19 : Profil d'énergie relié au profil de vitesse présenté à la figure précédente	69
Figure 3-20 : Secteur à l'étude pour la validation des courses sur rues résidentielles et artères principales.....	71
Figure 3-21 : Courses effectuées dans le secteur à l'étude le mercredi 31 août 2016 entre midi et 13h00.....	72
Figure 3-22 : Sous-ensemble de segments à l'étude pour la validation des portions de courses sur autoroute	73
Figure 4-1 : Cycle de conduite sur autoroute un mercredi à 5h00.....	77
Figure 4-2 : Cycle de conduite sur autoroute un mercredi à 16h00.....	77
Figure 4-3 : SAFD le mercredi sur autoroute à 5h00.....	79
Figure 4-4 : SAFD le mercredi sur autoroute à 16h00.....	79
Figure 4-5 : Cycle de conduite le dimanche à 9h00 sur rue résidentielle	80
Figure 4-6 : Cycle de conduite le dimanche à 9h00 sur artère principale.....	80

Figure 4-7 : Cycle de conduite le dimanche à 9h00 sur autoroute.....	81
Figure 4-8 : Consommation énergétique moyenne en Wh/km par type de segment routier	91
Figure 4-9 : Consommation énergétique moyenne en fonction du type de jour.....	92
Figure 4-10 : Consommation énergétique moyenne en fonction de l'heure de départ	93
Figure 4-11 : Consommation énergétique moyenne par type de segment routier et par jour.....	94
Figure 4-12 : Consommation énergétique moyenne les jours de semaine par type de segment routier et par heure.....	95
Figure 4-13 : Consommation énergétique moyenne le dimanche par type de segment routier et par heure.....	96
Figure 4-14 : Consommation énergétique sur rue résidentielle	97
Figure 4-15 : Consommation énergétique sur artère principale.....	97
Figure 4-16 : Consommation énergétique sur autoroute.....	98
Figure 4-17 : Consommation énergétique le lundi selon le type de segment routier	99
Figure 4-18 : Consommation énergétique le mercredi selon le type de segment routier	99
Figure 4-19 : Consommation énergétique le vendredi selon le type de segment routier.....	100
Figure 4-20 : Consommation énergétique le dimanche selon le type de segment routier	100
Figure 4-21 : Portions de courses le lundi à 8h00 sur rue résidentielle	105
Figure 4-22 : Portions de courses le mercredi à 18h00 sur rue résidentielle	105
Figure 4-23 : Portions de courses le mercredi à 11h00 sur artère principale.....	106
Figure 4-24 : Portions de courses le vendredi à 20h00 sur artère principale.....	106
Figure 4-25 : Portions de courses le mercredi à 17h00 sur autoroute.....	107
Figure 4-26 : Portions de courses le vendredi à 18h00 sur autoroute.....	107
Figure 4-27 : Distribution du nombre de portions de courses et de leur écart en fonction des jours	109
Figure 4-28 : Répartition des écarts au sein des journées à l'étude	109

Figure 4-29 : Distribution fréquentielle de l'écart en fonction du type de segment routier	110
Figure 4-30 : Répartition des écarts par type de segment routier	111
Figure 4-31 : Écart en pourcentage en fonction de la distance parcourue	113
Figure 4-32 : Écart entre la valeur observée et la valeur estimée pour les courses d'une distance de plus de 5 kilomètres	113
Figure 4-33 : Consommation énergétique moyenne estimée sur les portions de courses	115
Figure 4-34 : Consommation énergétique moyenne estimée sur les portions de courses la nuit	117
Figure 4-35 : Représentation des vitesses brutes et traitées d'une portion de course	119
Figure 4-36 : Représentation sur QGIS d'une portion de la course 21	119
Figure 4-37 : Consommation estimée sur les valeurs brutes et traitées	120

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

CH ₄	Méthane
CO ₂	Dioxyde de carbone
FTP	US Federal Test Procedure
GES	Gaz à effet de serre
GIS	Geographic Information System
GPS	Global Positioning System
MDDELCC	Ministère du Développement Durable et de la Lutte contre les Changements Climatiques
N ₂ O	Protoxyde d'azote
NEDC	New European Driving Cycle
O ₃	Ozone
QGIS	Quantum Geographic Information System
SAFD	Speed Acceleration Frequency Distribution

LISTE DES ANNEXES

Annexe A – Algorithme : choix des courses pour le développement des cycles de conduite 132

Annexe B – Paramètres calculés pour les cycles de conduite 144

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

Depuis des décennies, les changements climatiques sont au centre des préoccupations gouvernementales et de nombreuses recherches sont constamment effectuées afin de mieux comprendre les causes reliées au réchauffement planétaire. L'utilisation massive de combustibles fossiles comme le pétrole, le charbon et le gaz naturel a joué un rôle majeur dans l'augmentation des GES et cela a pour effet d'augmenter considérablement la température terrestre, engendrant ainsi des conséquences néfastes pour l'environnement. Parmi ces gaz, on retrouve essentiellement de la vapeur d'eau, du dioxyde de carbone (CO_2), du méthane (CH_4), du protoxyde d'azote (N_2O) et de l'ozone (O_3) (Gouvernement du Québec, 2018). Depuis les années 1880, les scientifiques ont constaté que la température moyenne de la Terre avait augmenté de $1,7^\circ\text{C}$ (NASA, 2017) et le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC) prédit une augmentation de la température moyenne de la planète entre $1,4^\circ\text{C}$ et $5,8^\circ\text{C}$ d'ici 2100 (Live Science, 2018). Bien que cette hausse de température puisse sembler un peu faible, cela est suffisant pour entraîner la fonte de la calotte glaciaire et, ainsi, augmenter le niveau de la mer, augmenter la fréquence et l'intensité des tempêtes et d'autres désastres naturels.

D'un point de vue global, le secteur du transport est l'un des plus grands contributeurs de gaz à effet de serre. Le transport compte pour 24% des émissions de CO_2 et c'est l'un des seuls secteurs où les émissions ne cessent d'augmenter (International Energy Agency, 2017); l'automobile, le transport de marchandise et l'aviation en sont les principaux contributeurs. Or, avec l'arrivée des véhicules hybrides et des véhicules électriques, la dépendance à l'énergie fossile tend à diminuer. Le véhicule hybride, disponible sur le marché dans différents modèles, est un compromis entre la voiture électrique et la voiture conventionnelle puisqu'il offre une plus grande autonomie au niveau du kilométrage qu'une voiture électrique, tout en étant moins polluant qu'une voiture conventionnelle. Les gens sont encore réticents à acheter des véhicules entièrement électriques puisque les prix sont élevés, les infrastructures de recharge sont limitées et le temps de conduite est lui aussi limité. De plus, il y a beaucoup d'incertitude au niveau de la gamme de conduite et au niveau de la durée de vie de la batterie. Par conséquent, fournir les facteurs qui influencent le taux de consommation d'énergie et les gammes de conduite au travers différents environnements peut s'avérer très utile pour promouvoir l'industrie des véhicules électriques et pour être en mesure de faire des choix plus éclairés lors de l'achat d'un nouveau véhicule.

De nombreuses études ont été effectuées au niveau de la consommation énergétique des véhicules conventionnels et les chercheurs s'intéressent de plus en plus aux véhicules électriques. L'évaluation de la consommation énergétique des véhicules est basée sur les cycles de conduite. Ces derniers représentent les comportements de conduite, dans différents environnements, sous forme de variations de vitesse et d'accélération au travers une période de temps précise. Un cycle de conduite peut être considéré comme une partie d'une procédure standardisée qui a pour but d'évaluer et de comparer les performances d'un véhicule dans un environnement réel ou de simulation, comme dans des conditions de laboratoire (Berzi, Delogu, & Pierini, 2016).

Puisqu'il y a de larges variations au niveau des habitudes de conduite, des besoins des utilisateurs, des caractéristiques de la route et des utilisateurs, il est connu que le cycle de conduite exact qui doit être satisfait pour la vie utile d'un véhicule n'est pas entièrement prédictible. Il est aussi probable qu'un seul cycle de conduite ne puisse pas représenter le vrai profil de conduite, en incluant toutes les conditions possibles à travers lesquelles un véhicule peut être utilisé dans sa vie, mais c'est la méthode qui se rapproche le plus de la réalité. Les cycles de conduite sont utiles à des fins de comparaisons puisqu'ils fournissent une estimation de l'économie d'essence et des émissions de GES. Il y a par contre une très grande variation entre les cycles de conduite développés dans des conditions de laboratoire permettant la certification des véhicules et ceux obtenus avec des données réelles. La différence entre les valeurs de consommation énergétique fournies par les concessionnaires et celles obtenues par les chercheurs à l'aide de données réelles peut être phénoménale ; la consommation réelle peut être jusqu'à 300% plus élevée que celle certifiée (Brady & O'Mahony, 2016)

Bien que de nombreux cycles de conduite sont présents dans la littérature, la majorité a été développée à partir de données réelles provenant de véhicules conventionnels. Or, il est prouvé qu'il y a une grande différence entre les cycles de conduite pour les véhicules conventionnels et ceux pour les véhicules électriques, en raison notamment des deux aspects suivants (Berzi et al., 2016):

- Les freins régénératifs : la présence du système de freinage de récupération d'énergie peut inciter les conducteurs à modifier leur style de conduite pour optimiser la consommation d'énergie.

- La fréquence des accélérations modérées et des fortes accélérations, spécialement à vitesses faibles, même pour les conducteurs non agressifs; cela peut être causé par la perception humaine de la réduction de bruit spécifique aux systèmes de traction électrique.

En plus d'être différents pour les véhicules électriques, les cycles de conduite ne sont pas transférables d'une région à l'autre à cause notamment des variations environnementales comme la topographie ou la régulation locale. Les villes développent donc de plus en plus leurs propres cycles de conduite à l'aide de données réelles provenant des véhicules conventionnels et électriques.

Finalement, l'analyse des caractéristiques de la consommation énergétique des véhicules électriques est la base pour l'étude de la location des infrastructures de recharge, des comportements éco énergétiques des conducteurs et pour la planification des routes en termes d'économie d'énergie (Zhang & Yao, 2015). De nombreuses études sont constamment effectuées afin de localiser les meilleurs endroits au sein d'une ville pour implanter des bornes de recharge afin d'être en mesure d'offrir une tranquillité d'esprit aux propriétaires de véhicule électrique.

1.1 Problématique

L'une des plus grandes lacunes dans l'élaboration des cycles de conduite est la faible disponibilité de données réelles. La majorité des études qui ont été faites a pour limitations le nombre de journées d'enregistrements, le nombre de véhicules utilisés ainsi que le nombre de chauffeurs différents qui participent à l'étude. Ces limitations peuvent facilement entraîner des biais dans les résultats puisque l'objectif principal du développement d'un cycle de conduite est de représenter de façon générale les comportements de conduite de la population, et non d'un type de personne en particulier. Certains modèles de consommation énergétique disponibles dans la littérature ne sont pas affectés par ces limitations, mais sont alimentés par des données qui ne proviennent pas du Québec. Or, il est reconnu que les comportements de conduite sont différents pour chaque ville et les caractéristiques environnementales, comme la température ambiante, ont un impact direct sur la consommation énergétique pour tous les types de véhicules (André et al., 2006).

Dans le cas présent, les données utilisées pour le développement des cycles de conduite, sur lesquels les modèles de consommation énergétique se basent, proviennent de l'entreprise montréalaise Taxelco qui gère notamment le service de transport Téo Taxi, une compagnie de taxis

entièrement électriques, installée à Montréal depuis novembre 2015. Seules les données provenant de systèmes embarqués à bord des véhicules de Téo Taxi ont été utilisées pour cette étude puisque la recherche se concentre sur la consommation énergétique des véhicules électriques dans un milieu urbain. La compréhension de la consommation énergétique au travers différents modèles permettra d'éclairer les chauffeurs de Téo Taxi au niveau de leur choix d'itinéraire afin d'optimiser leur chargement de batterie au travers leur journée d'opération. De plus, des modèles de consommation énergétique permettront éventuellement de développer un calculateur de chemin à consommation minimale pour les déplacements à bord d'un véhicule électrique à Montréal.

1.2 Objectifs

La réalisation du projet implique la mise en place d'une procédure de traitement automatisé des données de GPS issues de systèmes embarqués à bord des véhicules de Téo Taxi, le développement d'une méthode de création de cycles de conduite (qui alimentent les modèles de consommation énergétique des véhicules), la création de typologie de segments routiers basés sur les différences potentielles des cycles de conduite déduits et le développement de modèles de consommation énergétique pour les véhicules électriques.

La quantité de données GPS disponibles provenant des véhicules de Téo Taxi pour le développement des cycles de conduite est remarquable et c'est la raison pour laquelle la mise en place d'une procédure de traitement de données automatisé est requise. Cette procédure permettra de faciliter la gestion de données dans l'éventualité où d'autres reprendront les études effectuées. Le développement automatisé de différentes bases de données et du calcul des paramètres essentiels pour l'élaboration des cycles de conduite sont des exemples de ce qui a été réalisés.

Ensuite, pour le développement des cycles de conduite, la méthode utilisée se base sur les travaux de Nouri (Nouri, 2016). Sa thèse porte sur l'amélioration de l'estimation des émissions de CO₂ pour les véhicules conventionnels à Montréal. Dans le cadre de sa recherche, elle a développé un algorithme permettant le développement des cycles de conduite et c'est ce dernier qui est utilisé. Toutefois, une méthode d'automatisation du traitement des résultats a été développée vu la quantité importante de données à traiter.

Bien qu'un nombre très élevé de données soit disponible, il est primordial de segmenter la base de données astucieusement afin d'être en mesure de développer des cycles de conduite qui vont

représenter différents comportements de conduite. Une typologie de segments routiers a donc été proposée ainsi qu'une segmentation des données en fonction de l'heure et de la journée du déplacement. Cette segmentation permettra de développer des cycles de conduite et d'étudier les différents comportements de conduite en fonction de différents paramètres qui ont été déterminés. Encore une fois, une procédure de traitement automatisé des données est proposée.

Finalement, le développement des modèles de consommation énergétique peut commencer et c'est la formule de base d'énergie produite ou consommée lors du déplacement d'un véhicule électrique qui est utilisée. D'une part, les cycles de conduite permettent d'alimenter les modèles de consommation énergétique afin d'analyser l'impact que peuvent avoir les différents comportements de conduite sur la consommation énergétique des véhicules électriques. D'autre part, des données de consommation énergétique rapportées des taxis électriques fournies par Taxelco ont permis de vérifier la consommation estimée.

Ultimement, tous les objectifs énumérés précédemment permettront d'adapter un algorithme de calcul de chemin à consommation minimale pour les véhicules électriques à Montréal. Ce calculateur de chemin permettra aux chauffeurs de Téo Taxi de faire des choix éclairés au niveau de l'itinéraire choisi afin de minimiser leur consommation d'énergie.

En résumé, voici les cinq objectifs spécifiques au projet de recherche :

1. Développer une procédure automatisée qui permet de traiter les enregistrements GPS provenant des véhicules électriques de Téo Taxi afin de faciliter la gestion de la base de données initiale;
2. Développer des cycles de conduite en fonction des différences potentielles au niveau des comportements de conduite à bord d'un véhicule électrique dans le contexte montréalais;
3. Développer une procédure automatisée qui permet de sélectionner le cycle de conduite qui représente le mieux les comportements de conduite par rapport à la base de données initiale;
4. Créer une typologie de segments routiers basée sur la similarité des cycles de conduite développés;
5. Développer des modèles de consommation énergétique pour les véhicules électriques en milieu urbain.

1.3 Plan du mémoire

Ce mémoire est composé de cinq chapitres. Le premier chapitre porte sur un aperçu global de la recherche. Il permet d'introduire au lecteur les problèmes environnementaux auxquels fait face la planète, leurs causes et leurs conséquences. L'une des solutions pour atténuer les impacts négatifs liés au réchauffement climatique est l'arrivée des véhicules électriques, mais cette dernière est composée de lacunes. Les objectifs du projet sont aussi énumérés dans ce premier chapitre et permettent de donner une vue d'ensemble des travaux qui ont été réalisés.

Le second chapitre porte sur une revue de littérature des différents sujets abordés dans ce document. Puisque l'étude de la consommation énergétique des véhicules électriques est possible suite à la réalisation de divers objectifs, il est important de présenter ce qui a déjà été fait afin de bien comprendre les enjeux qui en découlent. La revue de littérature est donc divisée en cinq parties qui portent sur la problématique actuelle au niveau des émissions de GES à l'échelle mondiale et à l'échelle du Québec, sur l'émergence des véhicules électriques, sur le fonctionnement des cycles de conduite et sur la théorie au niveau de la consommation énergétique des véhicules électriques.

Le chapitre 3 établit la méthodologie appliquée pour réaliser les objectifs du projet de recherche. Ce chapitre représente le cœur de ce document puisqu'il présente les données utilisées, les méthodes appliquées et les motifs qui ont influencé certains choix plutôt que d'autres. Ce chapitre présente la procédure automatisée du traitement de données qui a été développée pour le développement des cycles de conduite et pour l'étude de données de consommation énergétique, les cinq étapes qui mènent au développement des cycles de conduite ainsi que les calculs pour estimer la consommation énergétique des véhicules électriques. La dernière section de ce chapitre porte sur la présentation d'un secteur à l'étude pour certaines courses de taxi. Le chapitre suivant, soit le quatrième, présentent les résultats issus de toutes les étapes énumérées de la méthodologie. La Figure 1-1 de la page suivante présente un schéma qui illustre les grandes lignes de la recherche.

Pour terminer, le chapitre 5 conclut le projet de recherche. Il présente une synthèse de la recherche, les contributions apportées, les limitations qui en découlent ainsi que les perspectives de recherche. Ce dernier chapitre apporte une vue d'ensemble de tout ce qui a été réalisé et de tout ce qui peut être intéressant à réaliser dans le futur, suite aux travaux présentés dans ce mémoire.

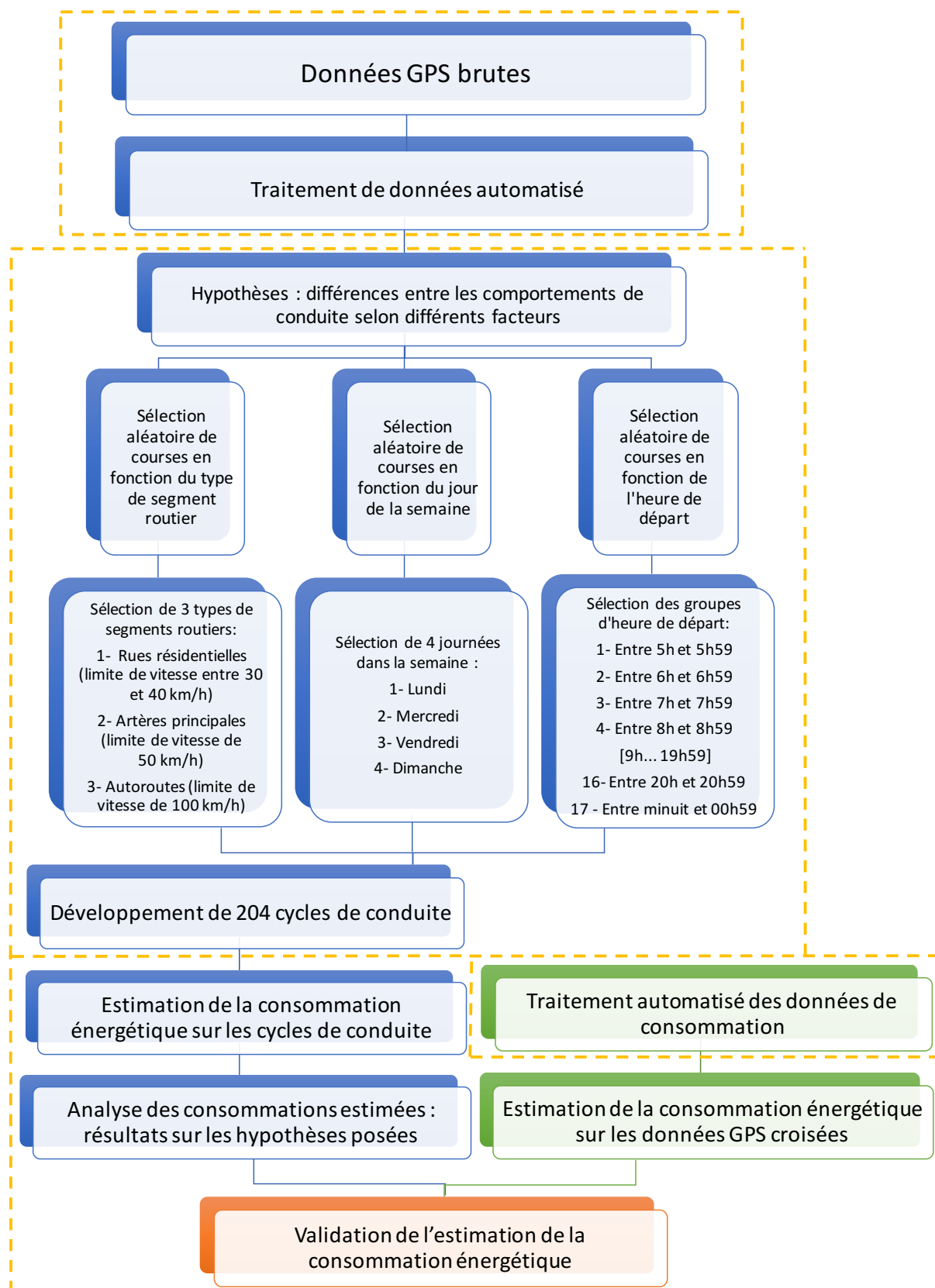


Figure 1-1 : Schéma méthodologique

CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE

Ce chapitre propose une revue de littérature sur les émissions de GES à l'international (section 2.1) ainsi qu'au Québec (section 2.2), sur l'émergence des véhicules électriques (section 2.3), sur les différents cycles de conduite existants et leur fonctionnement (section 2.4) et sur les modèles de consommation énergétique des véhicules électriques (section 2.5). La description des émissions de GES, autant au niveau mondial que du Québec, permet de bien comprendre l'importance que peut avoir l'arrivée des véhicules électriques dans un contexte de développement durable. La section 2.3 présente quelques données intéressantes sur le taux de pénétration des véhicules électriques au Québec, mais aussi sur certaines mesures qui ont été prises ailleurs dans le monde et qui sont inspirantes. Finalement, les deux dernières sections de ce chapitre portent le cœur du projet de recherche : le développement de cycles de conduite et de modèles de consommation énergétique. Il est toujours intéressant de connaître ce qui a déjà été réalisé sur ces sujets et ce qui motive les chercheurs à pousser leurs travaux encore plus loin.

2.1 Émissions de GES au niveau mondial

2.1.1 Aperçu global

Au niveau mondial, la part d'émissions de CO₂ émise par le secteur du transport était équivalente à 24% des émissions totales en 2015, selon l'agence internationale de l'énergie (International Energy Agency, 2017). Le transport routier représente à lui seul 75% de ces émissions.

Émissions mondiales de CO₂ par secteur (2015)

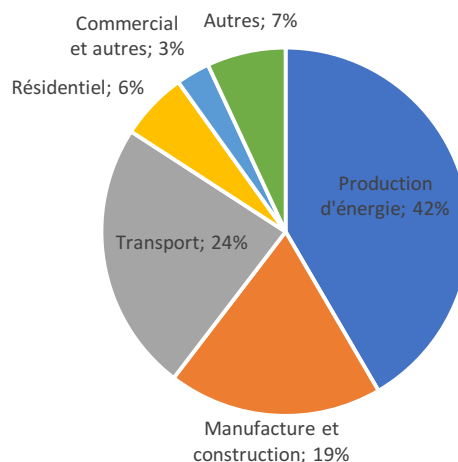


Figure 2-1 : Émissions mondiales de CO₂ par secteur

Source : Inspiré de l'Agence Internationale de l'énergie (International Energy Agency, 2017)

La Figure 2-1 démontre que les secteurs qui produisent presque la totalité des émissions de CO₂ sont ceux au niveau de la production d'énergie (42%), suivi par le transport (24%) et les manufactures et la construction (19%). Il serait avantageux au niveau environnemental de freiner cette proportion élevée d'émissions de CO₂ provenant du secteur du transport.

2.1.2 Le transport routier au niveau mondial

Comme mentionné à la section précédente, le secteur du transport compte pour 24% des émissions totales de CO₂ au niveau mondial et c'est l'un des seuls secteurs où les émissions ne cessent d'augmenter. Plus précisément, une augmentation de 68% des émissions a été observée entre 1990 et 2015 dans le secteur du transport alors qu'une augmentation de 75% a été observée au niveau du transport routier pour la même période de temps (International Energy Agency, 2017). Le pétrole est le carburant le plus utilisé dans le secteur du transport et sur la totalité du pétrole consommé, 81% provient du secteur routier. Les émissions de CO₂ ne proviennent pas seulement des véhicules au travers du procédé transformant le pétrole en carburant, mais aussi lors de la fabrication du véhicule. Si l'on considère les émissions totales de CO₂ d'un véhicule conventionnel moyen, 76% de celles-ci proviennent de son usage, 9% de la fabrication du véhicule et 15% sont liées aux émissions et pertes dans le système d'alimentation d'essence (Potter, 2003).

2.2 Contexte québécois

2.2.1 Émissions de GES

Le secteur du transport, au Québec, est celui qui produit le plus de GES. Selon l'inventaire québécois des émissions de gaz à effet de serre de 2015, disponible sur le site du Ministère du Développement Durable, Environnement et Lutte contre les Changements Climatiques (MDDELCC), le secteur du transport au Québec serait responsable de 41,7% des émissions de GES, suivi par le secteur de l'industrie avec 31,4%, le secteur résidentiel, commercial et institutionnel avec 10,4% et les secteurs de l'agriculture, des déchets et de l'électricité, avec respectivement 9,4%, 7,5% et 0,3% (voir Figure 2-2 et Figure 2-3).

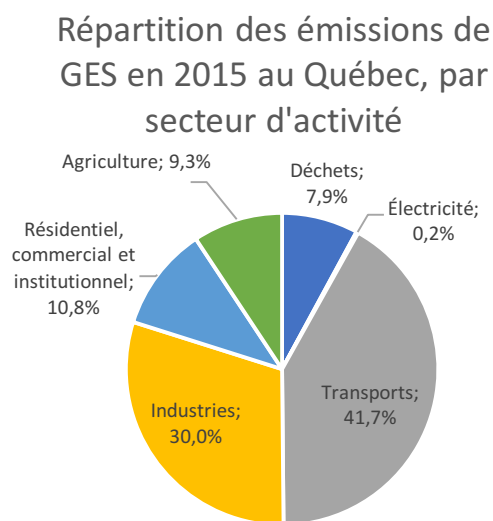


Figure 2-2 : Répartition des émissions de GES au Québec, en 2015, par secteur d'activité

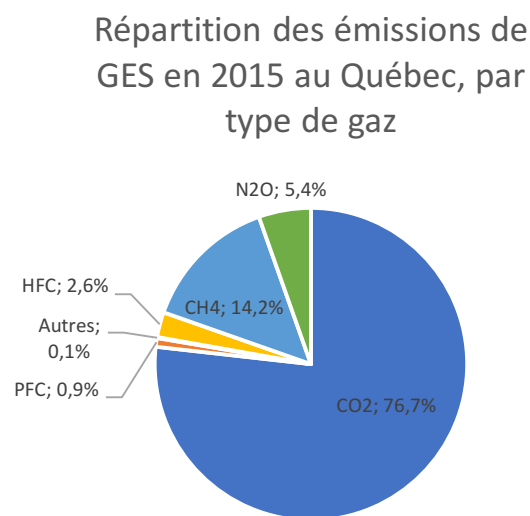


Figure 2-3 : Répartition des émissions de GES au Québec, en 2015, par type de gaz

Source : Inspiré du MDDELCC (MDDELCC, 2018)

Les valeurs présentées à la Figure 2-2 au niveau du secteur du transport englobent tous les types de transport : routier, aérien, maritime, ferroviaire et hors route. Or, le transport routier représente à lui seul 78,8% des émissions, ce qui équivaut à 32,8% des émissions totales de GES au Québec.

Heureusement, depuis quelques années, la tendance tend à diminuer, toujours selon les résultats publiés dans l'inventaire québécois des émissions de gaz à effet de serre du MDDELCC :

« Entre 1990 et 2015, les émissions de GES produites par le secteur des transports ont connu un accroissement de 21,3 %. Pendant cette période, elles ont augmenté de façon quasi constante, avec de légères baisses, jusqu'en 2011. Depuis 2011, la tendance générale est à la baisse. Pour sa part, le transport routier a vu ses émissions de GES augmenter de 35,7 % entre 1990 et 2015, avec une augmentation quasi constante de 1991 à 2007, suivie d'une stabilisation jusqu'en 2013 et d'une diminution par la suite » (MDDELCC, 2018, p.12).

Même si la population du Québec a augmenté de 18% et le produit intérieur brut (PIB) de 60% entre 1990 et 2015, les émissions de GES ont diminué de 8,8%. Il y a donc une diminution significative de production de GES par habitant et par million de dollars de PIB au Québec.

2.2.2 Le transport routier au Québec

Comme mentionné à la section précédente, le transport routier est responsable de 78,8% des émissions totales produites par le secteur du transport, soit 32,8% des émissions totales de GES au Québec. Le transport routier comprend les éléments suivants : les motocyclettes, les automobiles, les camions légers et les véhicules lourds. Le Tableau 2-1 présente l'évolution des émissions de GES produites par ce secteur au Québec entre 1990 et 2015, selon le type de véhicule.

Tableau 2-1 : Émissions de GES du transport routier au Québec en 1990 et 2015

Transport routier	Émissions (Mt éq. CO ₂)		Variations des émissions de 1990 à 2015		Part du secteur en 2015
	1990	2015	Mt éq. CO ₂	%	%
Automobiles	11,89	9,33	-2,57	-21,6	34,8
Camions légers	3,98	7,53	3,55	89,0	28,1
Véhicules lourds	3,85	9,87	6,03	156,5	36,8
Autres (motocyclettes, véhicules au propane et au gaz naturel)	0,02	0,07	0,05	254,4	0,3
Total	19,74	26,80	7,06	35,7	100,0

Source : Inspiré du MDDELCC (2018)

Entre 1990 et 2015, les hausses d'émissions de mégatonnes équivalentes de CO₂ sont, pour les camions légers et pour les véhicules lourds respectivement, de 89,0% et de 156,5% : « Ces hausses sont liées à l'accroissement du nombre de camions légers (215%) et de véhicules lourds (37%) sur les routes depuis 1990. » (MDDELCC, 2018, p.19). Au niveau du nombre d'automobiles au

Québec, il y a eu, toujours entre 1990 et 2015, une hausse de 17%, alors que les émissions de GES ont diminué de 21,6%. Ce phénomène qui paraît contradictoire peut être en partie dû au renouvellement du parc automobile, constitué d'automobiles plus éco énergétiques. Ce sont les nouvelles technologies qui permettent de diminuer la consommation d'essence, mais l'augmentation des véhicules hybrides et électriques en circulation au Québec contribuera certainement à la diminution des émissions de GES par rapport à l'augmentation du parc automobile.

2.2.3 L'électricité québécoise

Le réseau électrique au Québec est pratiquement totalement alimenté par l'hydroélectricité. Cette source d'énergie est reconnue officiellement depuis 2004, par les 154 pays faisant partie de la Conférence internationale sur les énergies renouvelables de Bonn en Allemagne, comme étant renouvelable (Hydro-Québec, 2018). Parmi les électricités renouvelables, on retrouve l'énergie solaire et éolienne, l'hydroélectricité, la biomasse et la géothermie. L'hydroélectricité québécoise n'entraîne aucun rejet toxique et très peu d'émission de GES. De toutes les filières de production d'électricité confondues, il n'en existe pas qui n'entraîne aucune émission puisque dans certains cas, la production d'électricité est indirectement liée à la production de GES. La Figure 2-4 présente les filières de production d'électricité et leurs émissions respectives.

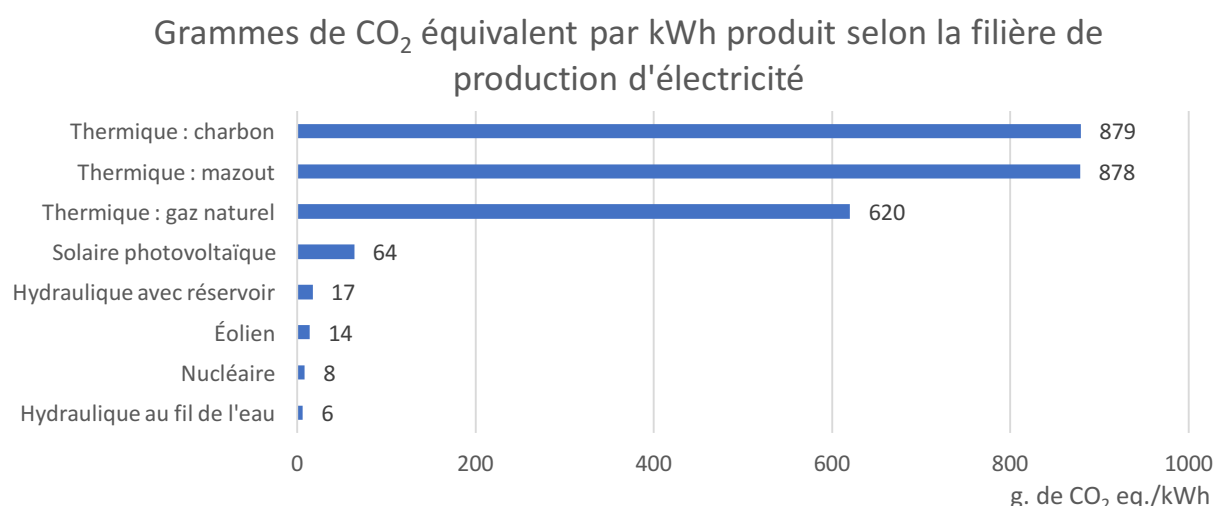


Figure 2-4 : Émissions de GES des différentes filières de production électrique

Source : Inspiré de Hydro-Québec (2018)

Les chiffres présentés à la Figure 2-4 tiennent compte de l'analyse du cycle de vie complet des équipements. Il est aussi possible de remarquer que le Québec produit très peu d'émissions de GES comparativement à d'autres endroits en Amérique du Nord (voir Figure 2-5).

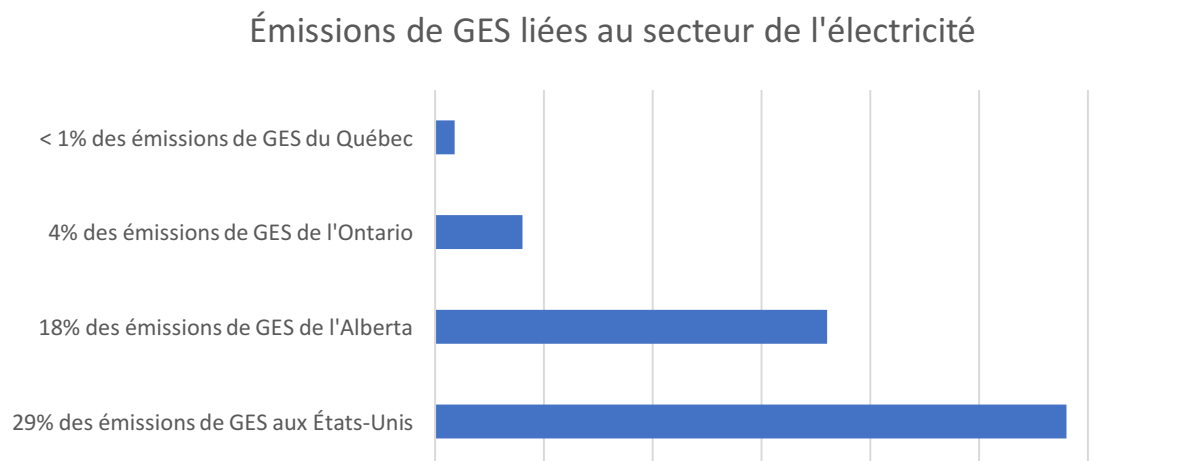


Figure 2-5 : Comparaison des émissions de GES liées au secteur de l'électricité en 2015

Source : Inspiré de Hydro-Québec (2018)

Au Québec, 98% de la production d'électricité provient de l'hydroélectricité, ce qui situe la province au deuxième rang au Canada pour le plus faible taux d'émissions de GES par habitant, tout juste après le territoire du Yukon (MDDELCC, 2018). Les voitures électriques, étant alimentées par cette hydroélectricité, permettront au secteur du transport de diminuer considérablement son taux de production de GES puisqu'elles sont considérées comme étant un moyen de transport à « zéro émission ». Après 150 000 kilomètres parcourus, le véhicule électrique aura produit 65% moins d'émissions de GES comparativement à un véhicule conventionnel et ce taux augmente jusqu'à 80% lorsque 300 000 kilomètres sont parcourus (CIRAIG, 2016). Or, il est faux de croire que l'utilisation d'un véhicule électrique est entièrement bénéfique pour l'environnement. Les impacts négatifs potentiels liés à l'achat d'un véhicule électrique sont nettement supérieurs à ceux d'un véhicule conventionnel lorsque celui-ci est peu utilisé, dû notamment à la fabrication du véhicule. Plus précisément, les impacts potentiels sont de 150% à 200% plus grands lors de l'achat du véhicule (CIRAIG, 2016). Il a aussi été démontré qu'il faut au minimum parcourir entre 29 000 kilomètres et 85 300 kilomètres (ce qui équivaut à 2 ans et 6 ans d'utilisation respectivement en se basant sur la moyenne du kilométrage annuel parcouru par les

québécois) avant d'atteindre un point d'équivalence en termes d'impacts environnementaux par rapport aux véhicules conventionnels. Ces impacts environnementaux sont au niveau de la santé humaine, de la qualité des écosystèmes, des changements climatiques et de l'épuisement des ressources fossiles. Seuls les impacts environnementaux au niveau de l'épuisement des ressources minérales sont 25% moins néfastes lors de l'utilisation d'un véhicule conventionnel (comparativement à l'utilisation d'un véhicule électrique et lorsque 150 000 kilomètres ont été parcourus); la production de la batterie et la production du véhicule électrique en sont les principaux responsables. Certaines composantes de la batterie sont recyclables comme le nickel, le cobalt, le cuivre et le lithium. Or, mis à part pour le cobalt, les techniques de recyclage ne sont économiquement pas attrayantes, ce qui diminue le taux de recyclage de ces éléments. De plus, la disponibilité des ressources métalliques, comme le lithium et le cobalt, diminuerait drastiquement s'il y avait une électrification complète de la flotte mondiale de véhicules légers.

Puisque la recherche porte sur l'étude de la consommation énergétique des véhicules électriques dans le contexte montréalais, le volet sur les effets négatifs ou positifs ailleurs dans le monde ne sera pas abordé dans ce mémoire. L'hydroélectricité permet aux propriétaires de véhicule électrique montréalais de diminuer leur empreinte écologique, mais cela est vrai que lorsqu'un seuil d'utilisation du véhicule est atteint. Or, cela n'est pas une réalité dans tous les pays. Seuls les effets néfastes au niveau de l'épuisement des ressources minérales ont été abordés puisqu'ils sont applicables au Québec.

2.3 Les véhicules électriques

Les véhicules électriques ont un taux de pénétration de plus en plus élevé, tant au Québec qu'au niveau international, mais ils sont encore loin de représenter 1% de la flotte automobile au Québec. On comptait 24 422 véhicules électriques au Québec, soit près de la moitié des 53 099 véhicules électriques au Canada en date du 15 mai 2018 (Association des Véhicules Électriques du Québec, 2018). Les véhicules électriques sont donc beaucoup plus populaires au Québec par rapport aux autres provinces canadienne. En plus d'utiliser une énergie propre et renouvelable, le prix au kilomètre est beaucoup moins élevé pour un québécois qui utilise un véhicule électrique par rapport à un véhicule conventionnel. Effectivement, le coût au kilomètre revient à environ 0,12\$/km lorsque l'essence est utilisée, alors qu'il est de 0,02\$/km avec l'électricité (Gouvernement du Québec, 2015).

Le Québec détient un plan d'action en électrification des transports basé sur la vision suivante : « En 2020, le Québec, qui dispose d'une énergie propre, disponible en grande quantité et à un coût concurrentiel, sera un chef de file de l'utilisation de moyens de transport propulsés par l'électricité et un précurseur en matière de mobilité durable. » (Gouvernement du Québec, 2015, p.iii). Ce plan d'action contient les trois grandes orientations suivantes : favoriser les transports électriques, développer la filière industrielle et créer un environnement favorable. Au travers de ces trois orientations, on retrouve 35 moyens d'intervention bien précis qui permettront au Québec d'atteindre les objectifs suivants de 2015 à 2020. En voici quelques exemples :

1. Atteindre 100 000 véhicules électriques et hybrides rechargeables ;
2. Réduire de 150 000 tonnes par année les émissions de GES générées par le secteur du transport ;
3. Réduire la consommation d'essence de 66 millions de litres par année ;
4. Créer 5 000 nouveaux emplois dans la filière des véhicules électriques.

Les moyens d'intervention sont en majorité basés sur des incitatifs financiers auprès des citoyens, des programmes de transport collectif électrique et des mesures de soutien pour favoriser le transport de marchandises électriques.

En Europe, le taux de pénétration des véhicules électriques par pays est très variable. La Figure 2-6 présente ce taux dans quelques pays d'Europe en 2016 (Automobile Propre, 2016).

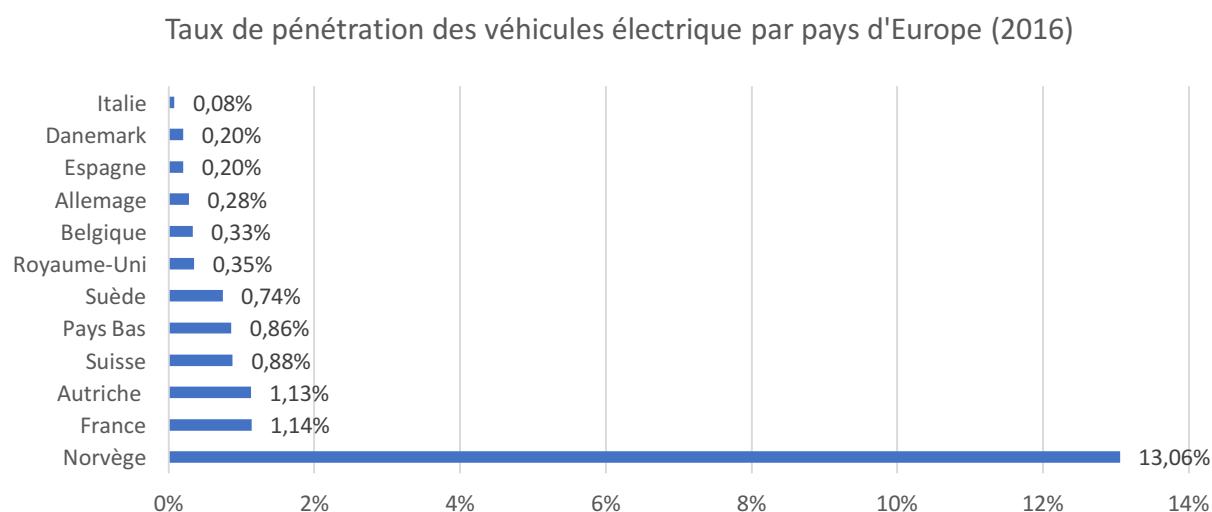


Figure 2-6 : Taux de pénétration des véhicules électriques par pays d'Europe en 2016

Il est possible de remarquer le fort taux de pénétration en Norvège par rapport aux autres pays d'Europe. Effectivement, ce pays se démarque en termes d'électrification des transports, même au niveau international. La Norvège est devenue le premier pays au monde à vendre un véhicule neuf électrique ou hybride sur deux (soit 50% de la vente totale de véhicules neufs). Voici trois raisons qui peuvent expliquer ce phénomène : « Pour les automobilistes, le choix de l'électrique est attractif : ils peuvent emprunter les voies de bus en ville, disposent de places de parking gratuites et électrifiées pour recharger leur véhicule et bénéficient d'exemptions aux péages. » (Lelièvre, 2018). Tout comme le Québec, la Norvège utilise l'électricité provenant des barrages hydroélectriques pour près de 100% de l'alimentation énergétique nécessaire à l'utilisation des véhicules électriques. Plus impressionnant encore, ce pays prévoit d'interdire la vente de voitures conventionnelles à partir de 2025, plaçant ainsi ce pays au premier rang, suivi par l'Inde qui prévoit cette interdiction à partir de 2030 (CNEWS, 2017) et en 2040 pour la France et le Royaume-Uni.

2.4 Les cycles de conduite

Comme mentionné au chapitre précédent, les cycles de conduite sont à la base des modèles de consommation énergétique, tant pour les véhicules conventionnels que pour les véhicules hybrides et entièrement électriques. Afin de quantifier les émissions produites par les véhicules, les chercheurs ont développé des cycles de conduite, qui sont en fait des profils de vitesses et d'accélérations au sein d'une période de temps, permettant de représenter les habitudes ou les comportements de conduite dans l'environnement étudié.

2.4.1 Les différents types de cycles de conduite

Les cycles de conduite permettent de réaliser différentes études dans plusieurs domaines d'application. D'une part, les cycles de conduite standards, comme le *US Federal Test Procedure* (FTP) et les cycles modaux, comme le *New European Driving Cycle* (NEDC), sont utilisés au niveau législatif : ils servent principalement à certifier les émissions produites par les véhicules en fabrication et à imposer les indications à suivre pour les manufacturiers afin d'obtenir un certain niveau d'émissions. Les cycles modaux sont une compilation d'accélérations constantes et de périodes de vitesses constantes, alors que les cycles de passages impliquent plusieurs variations de vitesses, typiques aux conditions de conduite sur route (Brady & O'Mahony, 2016). D'autre part, les cycles de conduite peuvent être développés à partir de données réelles et ces derniers ont

de larges applications dans la recherche ; ils permettent d'estimer les émissions, mais servent aussi pour le design automobile et pour les analyses de cycles de vie de la batterie des véhicules électriques.

Tous les chercheurs s'entendent pour dire que les caractéristiques de conduite de chaque ville sont uniques dues aux différences reliées à la flotte de véhicules, aux comportements de conduite des automobilistes et de la topographie du réseau routier (André et al., 2006). Une comparaison entre les données réelles collectées et celles provenant du NEDC, qui est un cycle de conduite représentant la conduite sur les routes européennes, a été réalisée à Athènes (Grèce) et les résultats sont impressionnants : dépendamment du véhicule conventionnel utilisé, la consommation énergétique est de 9% à 79% plus élevée, alors que les émissions peuvent être jusqu'à 300 fois plus élevées avec l'utilisation des données réelles (Tzirakis, Pitsas, Zannikos, & Stournas, 2006). Il est possible de retrouver différentes études comme celle effectuée en Grèce qui démontrent l'importance du développement des cycles de conduite propre à chaque pays ou même propre à chaque ville, afin d'estimer la consommation énergétique et les émissions plus précisément. Les facteurs qui affectent les comportements de conduite sont notamment la régulation locale, la structure de la route, le climat et la géographie (Nouri & Morency, 2017)

2.4.2 Méthode générale pour le développement de cycles de conduite

Les cycles de conduite doivent être développés afin de représenter le plus précisément possible les habitudes de conduite au sein des différentes catégories de route qu'ils représentent. Le processus général du développement de cycles de conduite est divisé en cinq étapes : la collecte de données, la génération de micro-segments, la classification de micro-segments, la sélection des mesures d'évaluation de performance et le développement des cycles de conduite (Nouri, 2016). Il est possible de retrouver dans la littérature des processus comportant seulement trois ou quatre étapes, mais les tâches énumérées précédemment sont toujours présentes, elles sont seulement assemblées en un nombre différents d'étapes (Brady & O'Mahony, 2016), (Berzi et al., 2016), (Hung, Tong, Lee, Ha, & Pao, 2007). Puisque cette recherche est inspirée des travaux de Pegah Nouri (Nouri, 2016) et qu'il est possible de retrouver dans sa thèse une revue littéraire très élaborée sur les cycles de conduite, les étapes du développement des cycles de conduite sont présentées très sommairement dans le cadre de cette recherche. Or, la dernière partie de cette section portera sur la tendance actuelle en termes de développement ou d'études des cycles de conduite.

2.4.2.1 Les cinq étapes

La collecte de données, qui est la première étape pour le développement de cycles de conduite, est une étape cruciale. Les données peuvent être recueillies selon trois méthodes : à l'aide de la technique de la voiture suiveuse (*chase car technique*), à l'aide de systèmes embarqués à bord des véhicules ou en combinant les deux précédentes méthodes. Le principe de la voiture suiveuse est simple : une voiture, qui est équipée d'instruments de mesure, suit un véhicule choisi au hasard et imite les comportements de conduite du véhicule, tout en collectant les données de vitesses. De nombreuses études effectuées un peu partout sur la planète portant sur le développement de cycles de conduite pour les véhicules conventionnels sont basées sur des données recueillies à l'aide de la technique de la voiture suiveuse. Les cycles de conduite d'Édimbourg en Écosse (Esteves-Booth, Muneer, Kirby, Kubie, & Hunter, 2001), de Pune en Inde (Kamble, Mathew, & Sharma, 2009) et de Sydney, de Melbourne et de Perth en Australie (Hung et al., 2007) en sont quelques exemples. Le principal avantage de la technique de la voiture suiveuse est le caractère aléatoire du choix du véhicule et de la possibilité de récolter des données provenant d'un nombre élevé de véhicules (Nouri, 2016).

Avec l'arrivée de nouvelles technologies, la méthode de la voiture suiveuse a un peu été mise de côté pour laisser place à la collecte de données à l'aide de systèmes embarqués. Les véhicules étudiés peuvent être équipés d'instruments de mesure qui permettent de fournir des renseignements sur leur positionnement en temps réel, comme les GPS, à partir desquels il est possible de calculer la vitesse et l'accélération du véhicule. D'autres équipements, comme le BUS de données CAN (système de transmission de données très répandu) et le *on-board diagnostic reader* (OBD II), permettent de recueillir des données sur la vitesse du véhicule, la vitesse du moteur, la température ambiante dans le véhicule et le chargement du moteur. Ces appareils de collecte de données fournissent des données plus précises, mais sont plus dispendieux et moins accessibles. Cette méthode est fortement utilisée lors du développement de cycles de conduite pour les voitures électriques puisque les systèmes embarqués peuvent enregistrer les données d'état de chargement de la batterie, permettant ainsi d'étudier la consommation énergétique des véhicules électriques en temps réel. Plusieurs pays et/ou villes ont effectué des études sur la consommation énergétique des véhicules électriques qui sont basées sur des cycles de conduite développés à partir de données provenant de systèmes embarqués : à Bruxelles (De Cauwer, Van Mierlo, & Coosemans, 2015), en

Californie (Wu, Freese, Cabrera, & Kitch, 2015), en Irlande (Brady & O'Mahony, 2016) et à Florence (Berzi et al., 2016).

Il est préférable d'utiliser les systèmes embarqués pour la collecte de données puisque la méthode de la voiture suiveuse ne fournit pas de détails sur le déplacement total effectué et les systèmes embarqués permettent aussi de récolter des données en continu sur une très longue période de temps et de façon plus précise. Il y a par contre un désavantage avec cette méthode : les données recueillies peuvent être biaisées par un changement dans le comportement de conduite du chauffeur puisque ce dernier sait qu'il est étudié. Il est possible de trouver dans la littérature des cycles de conduite basés sur des données provenant des deux méthodes afin de tirer profit des différents avantages de chacune (Hung et al., 2007).

Une fois les données collectées, il faut les diviser en micro-segments (étape 2). La définition de base d'un micro-segment est la suivante (traduit de l'anglais) : une séquence d'un profil de vitesse entre deux arrêts successifs (Nouri & Morency, 2017). Les déplacements sont donc représentés par une succession de micro-segments. Lorsque la définition du micro-segment n'est pas spécifiée dans la littérature, la définition de base est considérée. Cependant, les micro-segments peuvent aussi représenter les séquences d'un profil de vitesse divisé en intervalles de temps ou de distance homogènes, entre deux intersections signalisées, entre des intervalles de vitesse fixes, etc. Pegah Nouri a comparé les six méthodes suivantes de génération des micro-segments dans le contexte montréalais, pour conclure que la division en intervalles fixes de 250 mètres est la méthode de segmentation qui présente les cycles de conduite les plus représentatifs (traduction de l'anglais) (Nouri, 2016):

- 1- La séquence entre deux arrêts : le micro-segment est la section du profil de vitesse entre deux arrêts. Il débute avec un temps d'arrêt, il est suivi par une période de conduite et il se termine dès qu'un autre arrêt est effectué.
- 2- Intervalles fixes de temps (trois durées différentes) : le temps fixé définit les micro-segments. Trois intervalles de temps ont été évalués : 20, 40 et 60 secondes.
- 3- Distance fixe (cinq distances différentes) : les données ont été divisées en micro-segments de 50, 100, 250, 500 et 1000 mètres.
- 4- Intersections : un nouveau micro-segment commence dès qu'un véhicule arrive à une intersection signalisée.

- 5- Intervalles fixes de vitesse : des gammes de vitesses fixes ont été identifiées. Chaque fois qu'une vitesse est hors des limites de la gamme dans laquelle elle se trouve, un nouveau micro-segment commence. Dans l'étude, les classes de gammes de vitesses sont 0,]0, 20],]20, 40],]40, 60] and]60 et plus, en km/h.
- 6- Segmentation basée sur les événements d'accélération: les micro-segments sont définis en utilisant une méthode de segmentation sur l'accélération. Dans un premier temps, deux approches de segmentation ont été utilisées sur l'accélération instantanée : l'algorithme d'estimation de vraisemblance maximale et la méthode des K-moyennes.

Ensuite, il faut classer les micro-segments en utilisant une méthode de segmentation basée sur la similarité entre différents facteurs, comme la vitesse moyenne, l'accélération moyenne ou la proportion du temps d'arrêt d'un déplacement complet (étape 3). Entre temps, il faut identifier quelques critères qui deviendront les critères de sélection (étape 4), afin de sélectionner le cycle de conduite le plus représentatif de la base de données utilisée (nombre d'accélérations, de décélérations, d'arrêts, etc.). Les étapes 3 et 4 sont interchangeables.

Finalement, le développement des cycles de conduite (étape 5) peut débuter à l'aide de l'une des deux méthodes suivantes : la méthode stochastique ou le processus des chaînes de Markov. Les cycles de conduite sont construits en ajoutant un à un les micro-segments jusqu'à ce que la durée préalablement déterminée soit atteinte. Un nombre de cycles de conduite égal au nombre de déplacements présents dans la base de données est généré et la comparaison des critères présélectionnés calculés pour chacun des cycles de conduite obtenus individuellement et ceux obtenus à partir de la base de données complète permet de sélectionner le meilleur cycle de conduite. Pour la méthode stochastique, les micro-segments sont ajoutés un à un de façon aléatoire à partir des classes obtenues lors de l'étape de classification. Le seul critère à respecter est l'égalité de la proportion des classes par rapport à la proportion des classes de la base de données initiale. Le processus des chaînes de Markov s'appuie plutôt sur la probabilité que certains événements surviennent en succession. Une matrice de transition est ainsi construite et c'est à partir de cette matrice que les cycles de conduite sont développés.

2.4.3 Travaux récents

Comme pour la majorité des études scientifiques, le développement des cycles de conduite est en constante évolution. Des chercheurs essaient constamment d'améliorer la représentativité des cycles de conduite aux différents comportements ou aux habitudes de conduite. Dernièrement, des chercheurs ont ajouté une sixième étape au développement des cycles de conduites : la transformation des candidats aux cycles de conduite en cycles de conduite équivalents (Nyberg, Frisk, & Nielsen, 2016). Ce qu'ils déclarent comme étant un candidat aux cycles de conduite est exactement le produit final des cycles de conduite obtenu lorsque les cinq étapes présentées à la section précédente sont acheminées. Or, une étape supplémentaire permet de modifier ces candidats aux cycles de conduite en cycles de conduite équivalents basés sur les composantes de la force de traction moyenne appliquées au véhicule en utilisant un algorithme à trois étapes. En plus de reproduire les comportements de conduite, les cycles de conduites équivalents représentent aussi ce qui excite le véhicule (*vehicle excitation*). En d'autres termes, le cycle de conduite qui est déterminé comme étant le plus représentatif doit répondre à trois critères supplémentaires : la force de traînée, la force d'inertie et la force de résistance au roulement.

Mis à part le développement de cette nouvelle étape, les travaux effectués sur les cycles de conduite portent beaucoup plus sur la comparaison entre les cycles de conduite standards ou modaux, comme le FTP et le NEDC, et les cycles développés avec des données réelles. L'ère du « *big data* » permet de collecter des données massivement ce qui facilite le développement des cycles de conduite. Par exemple, à San Francisco, un outil a été développé pour développer des cycles de conduite en temps réel et la collecte de données se fait à partir d'une caméra vidéo qui capte les données de la trajectoire des véhicules à une fréquence de 0,1 secondes (Gauchia, Jafari, Zhang, & Gauchia, 2015). En Chine, des experts ont démontré que le manque de représentativité des cycles de conduite standards est dû à la durée trop courte des données utilisées; il faudrait un cycle de conduite d'une durée minimale de 154 minutes pour que les cycles standards soient représentatifs (Eisele, Horlbeck, Hann, Jäger, & Lienkamp, 2016).

Il y a eu deux recherches effectuées dernièrement qui portent sur le développement de cycles de conduite et qui ont toutes les deux segmenté les enregistrements GPS en fonction des types de routes empruntées (Pfriem & Gauterin, 2016), (Tewiele, Driesch, Weber, & Schramm, 2018). Les données proviennent dans les deux cas de véhicules électriques et il a été démontré qu'il est

important de segmenter les données en fonction du type de segment routier puisque certaines conditions environnementales (comme la vitesse maximale affichée) ont un effet direct sur les accélérations engendrées par le conducteur.

2.5 Modèles de consommation énergétique

Les modèles de consommation énergétiques disponibles dans la littérature sont nombreux pour les véhicules conventionnels et le sont de plus en plus pour les véhicules hybrides et les véhicules électriques. De façon générale, pour les véhicules conventionnels, ces modèles permettent d'estimer les émissions de GES, alors que pour les véhicules hybrides, ces modèles permettent d'estimer et de comparer la différence d'émissions produites par rapport aux véhicules conventionnels ou entièrement électriques. En ce qui concerne les véhicules électriques, les modèles de consommation énergétique permettent eux aussi de calculer les émissions de GES générées indirectement par la production d'électricité, mais permettent aussi de mieux prévoir la durée de vie de la batterie. De plus, ils augmentent la précision de l'estimation du déchargement de la batterie lors de l'utilisation, ce qui permet aux utilisateurs d'augmenter leur niveau de confiance face aux véhicules électriques et ainsi diminuer la réticence face à l'achat de cette technologie. Un modèle de consommation couplé avec un algorithme de calcul de chemin adapté aux véhicules électriques et basé sur l'économie d'énergie permettrait même aux conducteurs de modifier leurs trajets afin de les rendre plus économes en termes d'énergie totale consommée.

2.5.1 Facteurs qui influencent la consommation énergétique

Il est reconnu qu'un nombre particulièrement élevé de facteurs influencent la consommation énergétique des véhicules électriques, à un point tel qu'il est impossible de créer un modèle exact. Or, il est possible de créer des modèles de consommation très précis, mais ces derniers ne peuvent être utilisés que dans un contexte au sein duquel les conditions sont similaires à celles qui ont été utilisées pour l'élaboration du modèle; c'est essentiellement pour cette raison que la plupart des grosses villes ont tendance à créer leur propre modèle de consommation énergétique à partir de leurs propres cycles de conduite.

Tout d'abord, il est important de présenter la formule de base de l'effort de traction appliqué aux roues (F en Newton) (Wu, Freese, et al., 2015) :

$$F = M * a + \frac{1}{2} * \rho * C_D * A_f * v^2 + M * g * \Delta h + f_{ri} * M * g \quad \text{Équation 2-1}$$

Où

- M = masse du véhicule (kg)
- v = vitesse (m/s)
- a = accélération (m/s²)
- ρ = densité de l'air (kg/m³)
- C_D = coefficient de la résistance de l'air
- A_f = aire projetée du véhicule électrique (m²)
- g = constante de la force gravitationnelle (9,8 m/s²)
- Δh = différence de l'élévation par seconde (m)
- f_{ri} = coefficient de résistance au mouvement

Pour générer la force de traction F à l'instant t, la puissance requise (P), en Watt (W), peut être estimée par l'équation suivante :

$$P(t) = F(t) * v(t) \quad \text{Équation 2-2}$$

Où

- P = puissance (Watt)
- F = effort de traction (N)
- v = vitesse (m/s)

Finalement, pour calculer l'énergie consommée ou produite (E) en kilowattheure (kWh), il faut intégrer la puissance, soit (Fiori, Ahn, & Rakha, 2016) :

$$E = \int_0^t P(t)dt \quad \text{Équation 2-3}$$

Le watt est une unité qui représente la quantité d'énergie produite ou consommée par un appareil, alors que le watt-seconde est une unité de quantité d'énergie qui correspond à celle consommée

par un appareil de 1 watt de puissance pendant une durée d'une seconde (Energuides, 2018). Un watt-seconde est égal à un joule, donc un wattheure est égal à 3 600 joules (J) et un kilowattheure est égal à 3,6 méga joules (MJ). La puissance en watt et l'énergie en kilowattheure seront les unités de mesure utilisées pour décrire la consommation énergétique des véhicules électriques. Il est intéressant aussi de comparer l'énergie consommée par un véhicule électrique par rapport à un véhicule conventionnel : 1 kWh est égal à 8,9 litres d'essence au 100 kilomètres équivalents.

La vitesse et l'accélération instantanées sont des paramètres qui reviennent à plusieurs reprises dans l'équation 2-1. La présence de ces paramètres indique qu'il y a un lien direct entre le comportement de conduite et la consommation énergétique. Une étude a démontré qu'un comportement de conduite plus agressif peut augmenter de 40 Wh/km la consommation lorsque la vitesse moyenne est de 2 km/h, donc lorsqu'il y a de fortes accélérations à faible vitesse (Badin et al., 2013). Cette même étude démontre que lorsque la vitesse moyenne est de 20 km/h, le comportement de conduite plus agressif engendre une augmentation d'environ 20 Wh/km et cette augmentation diminue légèrement à mesure que la vitesse moyenne augmente. À 100 km/h, la différence de consommation peut être d'environ 10 Wh/km.

L'équation 2-1 permet de calculer l'énergie mécanique totale requise aux roues pour permettre le mouvement du véhicule électrique, mais divers autres paramètres influencent la consommation énergétique; de nombreuses études portent sur les facteurs qui peuvent influencer la consommation énergétique et ces derniers sont présentés dans les sections suivantes.

2.5.1.1 Utilisation des auxiliaires

Il a été démontré que l'utilisation des auxiliaires peut affecter grandement la consommation énergétique des véhicules électriques, dépendamment de l'intensité d'utilisation. Ces derniers représentent toutes les composantes du véhicule qui requièrent de l'énergie autre que celles qui permettent au véhicule de fonctionner. Par exemple, l'air climatisée, le chauffage, les phares, la radio et les essuies glaces sont des auxiliaires qui augmentent la demande en énergie. Les résultats d'une recherche sur l'influence des auxiliaires au niveau de la consommation énergétique des véhicules électriques ont démontré que lorsque le véhicule roule à faible vitesse (moyenne de 20 km/h), les auxiliaires peuvent consommer de 15% à 40% de la totalité de l'énergie consommée lorsqu'ils ont une puissance de 250 watts et 750 watts respectivement (Badin et al., 2013). Cette même recherche démontre qu'il y a une différence de consommation lorsque la vitesse moyenne

est plus élevée pour les deux mêmes puissances : lorsque la vitesse moyenne est de 60 km/h, les auxiliaires consomment de 5% à 15% de l'énergie totale consommée par le véhicule.

2.5.1.2 Température

Selon une étude effectuée au Danemark, l'énergie consommée par kilomètre (kWh/km) peut augmenter de 34% lors de la conduite en hiver par rapport à l'été : 0,225 kWh/km en hiver vs 0,168 kWh/km en été (Fetene, Kaplan, Mabit, Jensen, & Prato, 2017). La température moyenne au Danemark tourne autour de 0°C en hiver et autour de 20°C en été (Climats et voyages, 2018). Or, puisque les températures moyennes à Montréal en hiver tournent autour de -7°C et autour de 18°C en été (Ville de Montréal, 2018), la différence réelle entre les deux saisons risque d'être encore plus élevée. La température a un effet direct sur le rendement de la batterie des véhicules et ce paramètre n'est pas pris en compte dans l'équation 2-1. L'effet exact de la température sur la batterie est difficile à déterminer, mais des chercheurs ont démontré qu'elle a un effet non linéaire à profil en U lorsque la température est très froide ou très chaude. C'est à 14°C que la température aurait l'impact le moins important sur le déchargement de la batterie (Fetene et al., 2017).

2.5.1.3 Freins régénératifs

Une caractéristique clé des véhicules électriques est les freins régénératifs qui permettent la récupération d'énergie lors du freinage. Le moteur inverse ses opérations et agit comme générateur, en convertissant l'énergie cinétique en énergie électrique, laquelle est emmagasinée dans la batterie du véhicule. Il y a par contre des limitations à ce phénomène : lorsque l'état de chargement de la batterie est maximal, cette dernière ne peut pas emmagasiner de l'énergie supplémentaire et il y a une limite de couple maximum pour les machines électriques (Genikomsakis & Mitrentsis, 2017). Si le couple engendré par les freins excède le couple maximum du moteur, le reste de la puissance est rejetée en chaleur. De plus, lorsque la vitesse est basse, le système de freins régénératifs ne transfère pas d'énergie. Il a été démontré que les freins régénératifs peuvent récupérer plus de 50% de l'énergie lorsque la vitesse est de 20 km/h et près de 30% lorsque la vitesse est de 60 km/h (Badin et al., 2013). Ces caractéristiques démontrent qu'il est plus avantageux d'utiliser un véhicule électrique dans un milieu urbain puisque les vitesses sont moins élevées.

2.5.1.4 État de chargement de la batterie

L'état de chargement de la batterie a un effet direct sur l'efficacité du moteur. La plupart des moteurs électriques sont créés pour opérer de 50% à 100% de leur charge et leur plus haute efficacité se retrouve autour de 75% (Genikomsakis & Mitrentsis, 2017). Pour les charges sous 50%, l'efficacité du moteur diminue drastiquement. Une autre étude effectuée au Danemark a démontré que le taux de consommation énergétique, illustrée en pourcentage de la batterie par kilomètre parcouru en fonction de l'état de chargement de la batterie au début du déplacement, diffère en fonction du chargement initial de la batterie (Fetene et al., 2017). Plus précisément, le niveau initial de la batterie aurait un effet polynomial de 3^e degré sur le pourcentage d'énergie consommée par kilomètre. Lorsque l'état de chargement de la batterie est égal à 100%, la consommation énergétique est égale à 1,22%/km et diminue pour atteindre un minimum local un peu inférieur à 1,19%/km lorsque le chargement de la batterie est égal à 77%. À partir de ce minimum local, le taux de consommation énergétique augmente pour atteindre environ 1,23%/km lorsque le chargement de la batterie est à 40% et recommence à diminuer tranquillement.

2.5.1.5 Résumé des facteurs

Pour énumérer tous les facteurs possibles qui ont une influence sur la consommation énergétique et leur impact sur cette dernière, il faudrait des dizaines, voire des centaines de pages. Afin d'alléger cette section, un résumé des facteurs sous la forme de différents schémas permet tout de même d'avoir un aperçu de tous ces facteurs et les schémas suivants démontrent tout ce qui peut influencer la consommation énergétique des véhicules électriques. Ces schémas sont inspirés d'un article qui se concentre entièrement sur la détermination des principaux facteurs influençant la consommation énergétique des véhicules électriques ainsi que les paramètres qui en découlent lorsque le véhicule électrique est en fonction (Li, Stanula, Egede, Kara, & Herrmann, 2016).

Pour commencer, les différentes technologies qui composent le véhicule et le véhicule lui-même ont une influence sur la consommation. Le type de déplacement influence aussi la consommation. Voici les paramètres qui peuvent avoir un impact (voir Figure 2-7).

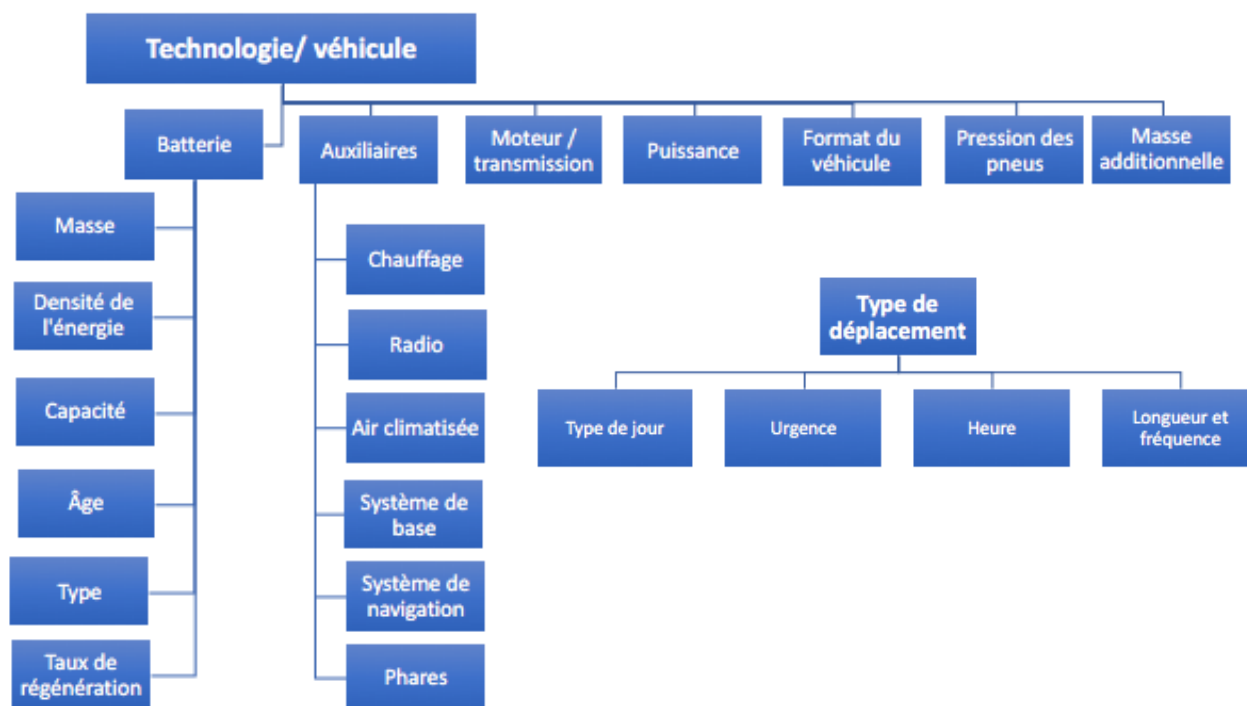


Figure 2-7 : Facteurs au niveau de la technologie du véhicule et du type de déplacement qui influencent la consommation énergétique

Pour continuer, les environnements artificiels et naturels influencent eux aussi la consommation. Ces facteurs permettent de mieux comprendre la raison pour laquelle les cycles de conduite sont uniques à leur ville (voir Figure 2-8 et Figure 2-9).



Figure 2-8 : Facteurs au niveau de l'environnement artificiel qui influencent la consommation énergétique

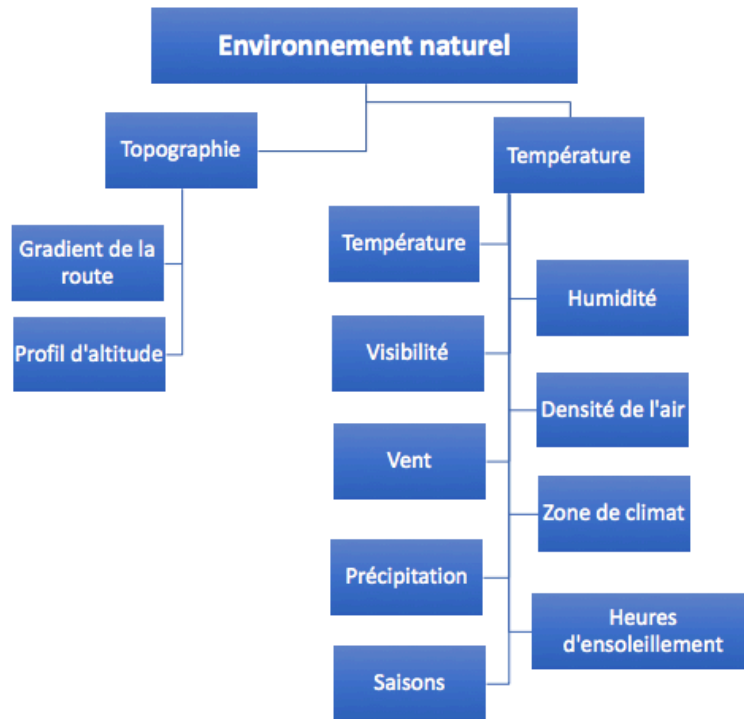


Figure 2-9 : Facteurs au niveau de l'environnement naturel qui influencent la consommation énergétique

Finalement, les différentes mesures de consommation et le type de conducteur sont les derniers facteurs qui peuvent avoir une influence sur la consommation (voir Figure 2-10).

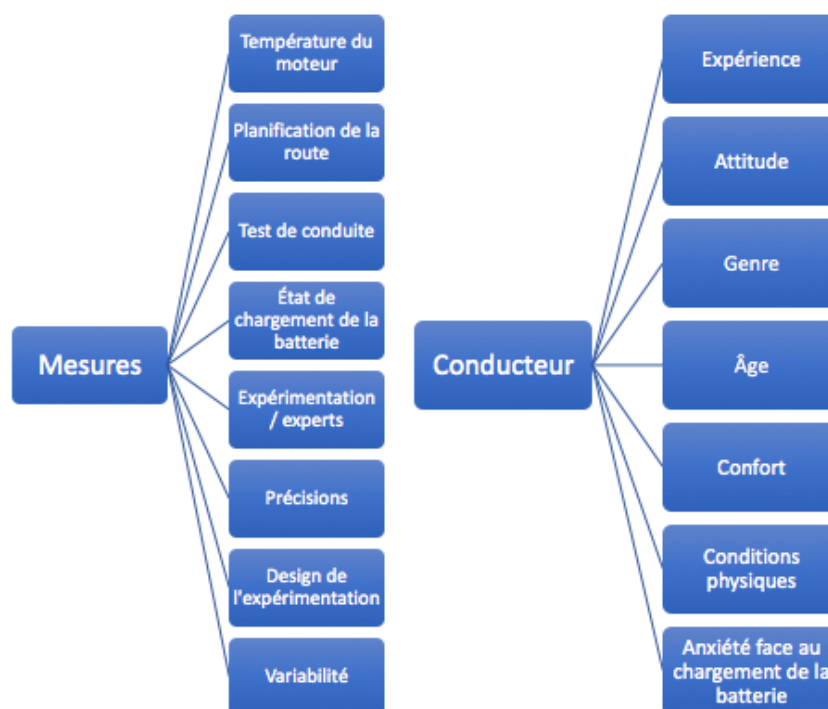


Figure 2-10 : Facteurs au niveau des mesures et du conducteur qui influencent la consommation énergétique

Les différentes figures présentées dans cette section résument bien les facteurs qui affectent la consommation énergétique des véhicules électriques. Or, ces facteurs ne sont pas pris en compte dans l'équation 2-1, ce qui rend l'estimation de la consommation très complexe.

2.5.2 Différents modèles de consommation énergétique

De nombreux modèles de consommation énergétique ont été développés permettant d'estimer la consommation énergétique des véhicules électriques. Des chercheurs ont développé, à l'aide de données GPS recueillies au Japon en 2013, trois types de modèles différents proposant une approche qui démontre la distribution et l'ampleur de la variabilité au niveau de l'efficacité énergétique des véhicules électriques en fonction de différents facteurs. Les sept modèles suivants sont analysés et les résultats obtenus sont comparés : deux modèles basés sur la régression linéaire à deux niveaux à effets aléatoires (*two-level random intercept models*), trois modèles de régression linéaire à effets mixtes à deux niveaux (*two-level mixed-effects models*) et deux derniers à effets mixtes à trois niveaux (*three-level mixed-effects models*) (Liu, Wang, Yamamoto, & Morikawa, 2016). Les modèles à effets mixtes sont bénéfiques pour augmenter la compréhension de la

variabilité de l'efficacité énergétique associée à des variations inobservables au niveau des caractéristiques de conduite et des conditions de congestion. Dans ce type de modèle, les effets fixes sont exprimés à l'aide d'un coefficient de régression standard, alors que les effets aléatoires sont basés sur leur variance et leur covariance estimées. Les effets fixes sont, par exemple, la distance parcourue, la vitesse, l'utilisation des auxiliaires ou le gradient de la route. Les effets aléatoires sont le type de déplacement, le mois de l'année, les caractéristiques du conducteur et le type de possession du véhicule. Cette étude a permis de prouver que les modèles à trois niveaux sont supérieurs au niveau de la précision de l'estimation de la consommation énergétique. Les variances de la consommation peuvent être expliquée par la combinaison du type de déplacement, du mois de l'année et des caractéristiques du conducteur ainsi que par la combinaison du type de déplacement, des caractéristiques du conducteur et du type de possession du véhicule électrique (véhicule privé ou corporatif).

D'autres travaux se concentrent sur l'influence du gradient de la route (Liu, Yamamoto, & Morikawa, 2017), (Travesset-Baro, Rosas-Casals, & Jover, 2015), de la vitesse et de l'accélération instantanées (Tanaka, Ashida, & Minami, 2008), (Wu, He, Yu, Harmandayan, & Wang, 2015), (Galvin, 2017), des pertes en termes d'énergie à même la batterie lorsque le véhicule se recharge et se décharge (Apostolaki-Iosifidou, Codani, & Kempton, 2017), du choix de l'itinéraire (Baum, Dibbelt, Pajor, & Wagner, 2013), de l'utilisation de l'air climatisée (Chiu, Tsai, & Lin, 2014), des comportements de conduite et des freins régénératifs (Braun & Rid, 2017), (Lv, Zhang, Li, & Yuan, 2015) sur la consommation énergétique des véhicules électriques.

2.6 Conclusion

Puisque les cycles de conduite déjà développés pour les véhicules conventionnels ne sont pas transférables pour les véhicules électriques et que les cycles de conduite sont uniques d'un point de vue géographique, les recherches sur le sujet ne peuvent que s'intensifier. De plus, les enjeux environnementaux actuels forcent les constructeurs automobiles à concevoir des véhicules de plus en plus éco énergétiques, augmentant ainsi la pertinence d'avoir des cycles de conduite plus représentatifs des habitudes de conduite. Finalement, puisque les facteurs qui influencent la consommation énergétique des véhicules électriques sont très vastes, les possibilités de recherche sont nombreuses. Une meilleure connaissance de ces facteurs permet d'augmenter le niveau de confiance des gens face à l'utilisation de véhicules électriques.

CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE

Les déplacements des différents véhicules de Téo Taxi sont suivis et enregistrés en continu sous forme de traces GPS. Ces données permettent, entre autres, de fournir de l'information en temps réel sur la position géographique des taxis au client qui fait appel au service d'un taxi à l'aide d'une application sur un téléphone intelligent. Or, en plus d'améliorer le service offert, l'enregistrement des données GPS permet aussi aux experts de faire des études au niveau de la consommation énergétique des véhicules électriques.

Il y a deux types de données fournies par Taxelco : celles concernant la position géographique des différents taxis dans le temps et celles concernant la consommation énergétique des taxis sur une période de temps définie. Tout au long de ce document, ces deux ensembles de données feront références aux données GPS et aux données de consommation respectivement. Pour la construction des cycles de conduite, seules les données GPS sont importantes, alors que pour l'élaboration de modèles de consommation énergétique, les deux ensembles de données sont nécessaires; les données reliées à la consommation énergétique permettent de connaître l'énergie consommée pour une certaine période de temps, alors que les données GPS permettent de valider la consommation rapportée suite à la reproduction des déplacements par cycle de conduite sur la même période de temps.

Le traitement préliminaire de données est une étape cruciale pour cette recherche. La quantité de données disponible est impressionnante, ce qui rend le traitement de données très fastidieux. Le traitement de données s'est fait à l'aide de PostgreSQL, qui est un système de gestion de base de données. Afin d'alléger la tâche, seul un échantillon de données est utilisé et ce chapitre se concentre sur la présentation des étapes pour l'obtention des bases de données qui seront utilisées pour répondre aux différents objectifs du projet de recherche. Plus précisément, ce chapitre est divisé en cinq sections distinctes qui présentent la méthodologie pour atteindre les objectifs suivants : traiter de façon automatisée la base de données des enregistrements GPS (section 3.1), développer des cycles de conduite (section 3.2), valider les enregistrements de la base de données de consommation énergétique rapportée (section 3.3), calculer la consommation énergétique des véhicules électriques à l'aide d'une procédure automatisée (section 3.4) et valider l'énergie consommée issue des cycles de conduite à partir de différents secteurs géographiques précis (section 3.5).

3.1 Traitement de données automatisé des enregistrements GPS

La base de données des enregistrements GPS des véhicules de Téo Taxi est très volumineuse. Différents enregistrements ne sont pas utiles dans le cadre de cette recherche et différentes erreurs d'enregistrements sont présentes dans cette base de données, notamment dû à des pertes de signal. Le traitement de données automatisé s'avère être une étape cruciale pour gérer cette quantité de données et pour optimiser le temps de traitement. Cette section portera essentiellement sur la méthodologie proposée afin de faciliter cette tâche ardue.

3.1.1 Données brutes

Au total, 281 875 023 enregistrements GPS, recueillis entre le 1^{er} juillet 2016 et le 31 décembre 2016, sont présents dans la base de données fournie par Taxelco. Les informations présentes dans la base de données sont présentées dans le Tableau 3-1:

Tableau 3-1 : Données brutes de la base de données fournie par Taxelco

Champ	Définition
Gid	Clé unique de l'enregistrement
Id	Clé unique de l'enregistrement
Date_time	Date et heure de l'enregistrement (aaaa-mm-jj hh:mm:ss)
Vehicle_id	Identifiant du véhicule
Lat	Coordonnée géographique : latitude
Lon	Coordonnée géographique : longitude
Statut_dome	Statut du véhicule
Geog	Coordonnée géographique équivalente à la longitude et latitude

Le champ « vehicle_id » donne de l'information sur le type de véhicule relié à l'enregistrement. Les véhicules ayant un identifiant entre 100 et 199 sont de marque Tesla du modèle SD, ceux entre 200 et 299 sont de marque Kia Soul, ceux dans les 300 sont de marque Nissan Leaf alors que ceux de 400 et plus sont des Tesla du modèle XD. Il y avait 17 Tesla du modèle SD, 74 Kia Soul, 23 Nissan Leaf et 6 Tesla XD, pour un total de 120 véhicules en 2016. Il y a aussi quelques enregistrements effectués avec des identifiants de véhicule de -1, 1 et 778, mais ce sont des véhicules qui effectuaient des tests (identifiants fictifs) et qui ne seront pas pris en compte. Il est important de mentionner qu'un véhicule n'est pas attribué à un chauffeur en particulier; les véhicules sont plutôt attribués aléatoirement en fonction de leur disponibilité.

Le champ « Statut_dome » fournit de l'information au niveau du statut du chauffeur, donc en quelque sorte, au niveau du véhicule. Le statut peut être 0, 1, 2, 3, 5 ou 7, mais le seul qui est pertinent dans le cadre de cette recherche est lorsque le taxi est en course, soit le numéro 0. Lorsque le taxi est en course, les enregistrements GPS sont effectués à plus grande fréquence, qui varie de façon générale entre 1 et 3 secondes, alors qu'elle est plutôt de 10 secondes pour les autres statuts, diminuant ainsi la précision des données. Une course signifie que le chauffeur de taxi effectue un déplacement complet avec un ou plusieurs clients (le nombre de clients présents dans le véhicule n'est pas disponible). Les autres statuts peuvent signifier que le chauffeur est en train de se connecter au dispositif GPS, que le chauffeur est disponible mais pas en course ou tout simplement indisponible. Bref, il y a au total 80 326 647 enregistrements pour lesquels le statut du chauffeur est déterminé comme étant en course, soit 28,5% des enregistrements totaux de la base de données et seuls ces enregistrements ont été utilisés à des fins d'analyses. Cette base de données est nommée la table mère.

Les champs « Date_time », « Lon », « Lat » et « Geog » permettent de situer les véhicules dans le temps et de les localiser dans l'espace. Ce sont ces données qui permettront la construction d'une base de données pour l'élaboration des différents cycles de conduite. Certains enregistrements se situaient à l'équateur (longitude et latitude de 0 degré) à cause d'un dysfonctionnement du dispositif GPS ou à une perte de signal et ces derniers ont tout simplement été supprimés de la base de données.

À partir de la table mère, des tables filles ont été créées par journée d'enregistrement. Puisque les données utilisées ont été enregistrées entre le 1^{er} juillet et le 31 décembre 2016, 184 tables filles ont été créées. L'utilisation d'un algorithme qui classe les données en fonction de la journée d'enregistrement a été utilisée. Voici un schéma qui démontre le fonctionnement de cet algorithme :

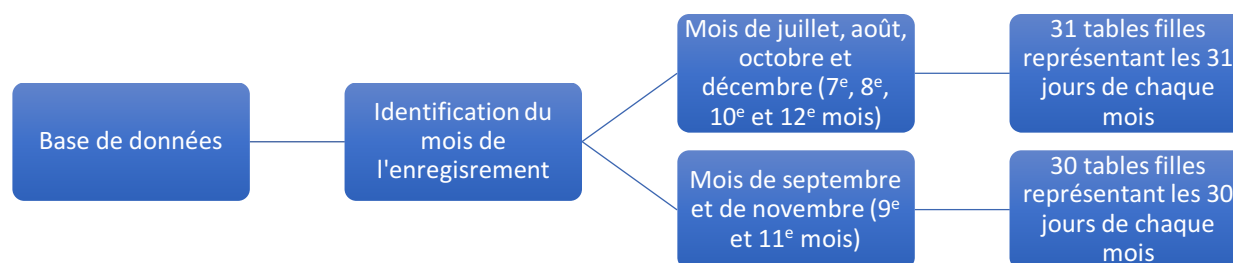


Figure 3-1 : Division de la table mère en tables filles

Un algorithme similaire a été utilisé tout au long du traitement de données qui permet d'aller modifier les 184 tables de données de façon itérative. La division de la table mère par journée d'enregistrements a permis de faciliter la gestion de données pour des motifs qui seront présentés tout au long de ce document.

3.1.2 L'identifiant unique de la course

Une fois les tables filles créées, il a fallu attribuer un identifiant unique à chacune des courses effectuées, nommé `id_course`. Cet identifiant est nécessaire pour le développement des cycles de conduite. Les champs uniques disponibles reliés à une course sont le numéro du véhicule et la date. Or, il n'y a pas qu'une seule course par jour effectuée par un même véhicule; il a donc fallu trouver un moyen de les classer. La différence de temps entre deux enregistrements consécutifs d'un même véhicule a donc été calculée afin d'identifier les périodes de temps sans activité. Lorsque la période de temps entre un enregistrement (i) et le suivant (i+1) dépassait 30 secondes pour un même véhicule, les deux enregistrements (i et i+1) étaient sélectionnés. L'enregistrement i représente la fin d'une course (j) alors que l'enregistrement i+1 représente le début d'une nouvelle course (j+1). En continuant dans cette logique, l'enregistrement i+2 représente la fin de la course j+1 et l'enregistrement i+3 le début de la course j+2. Une table par jour a donc été créée, rassemblant toutes les données associées aux débuts et aux fins de courses pour chaque véhicule. Cette méthode omettait par contre le premier enregistrement relié à la première course de la journée d'un véhicule ainsi qu'au dernier enregistrement relié à la dernière course. Ces deux enregistrements, faciles à identifier puisqu'ils représentent le premier et le dernier enregistrement par jour par véhicule, ont

été rajoutés à la table. Une fois le couple de données du début et de fin de course créé, un identifiant unique leur a été attribué, pour un total de 197 788 identifiants uniques, allant de 1 à 197 788.

Le choix de l'intervalle de 30 secondes qui sépare deux courses est arbitraire. Les enregistrements ayant une différence de moins de 30 secondes avec l'enregistrement suivant représentent 99,998% de la base de données. Quoi qu'il en soit, une course ayant une perte de signal de plus de 30 secondes, comme un déplacement dans le tunnel Ville-Marie qui entraîne des pertes de signal importantes, ne serait pas prise en compte due à l'imprécision que cela peut apporter à la trace GPS. Puisque ce travail ne vise pas à décrire les courses mais bien à identifier un ensemble de points apte à construire des cycles de conduite, ce choix n'a pas d'impact sur la démarche et les résultats qui en découlent.

3.1.3 Durée, distance, vitesse et accélération

Comme mentionné plus tôt, il est possible de calculer la durée en secondes entre deux enregistrements consécutifs en classant tous les véhicules par leur identifiant, par date et par heure d'enregistrements. Une fonction dans PostgreSQL permet aussi de calculer la distance entre deux enregistrements consécutifs à partir de leur coordonnées géographiques (longitude et latitude). Une fois ces deux paramètres calculés, il est possible de calculer la vitesse et l'accélération entre ces deux enregistrements en utilisant les deux équations suivantes :

$$vitesse (km/h) = \frac{\text{distance entre deux enregistrements consécutifs}}{\text{durée entre deux enregistrements consécutifs}} \quad \text{Équation 3-1}$$

$$accélération (m/s^2) = \frac{\text{différence de vitesse entre deux enregistrements consécutifs}}{\text{durée entre deux enregistrements consécutifs}} \quad \text{Équation 3-2}$$

Ces paramètres ont été calculés pour l'ensemble des enregistrements présents dans la base de données à l'aide de l'algorithme décrit précédemment permettant de diviser la table mère de données en 184 tables filles, représentant chacune une journée d'enregistrements, du 1^{er} juillet 2016 au 31 décembre 2016.

3.1.4 Interpolation des données

Pour la construction des cycles de conduite, il est nécessaire d'avoir des enregistrements de fréquence égale. Or, les enregistrements disponibles sont irréguliers en termes de temps. Voici la

distribution fréquentielle des données selon l'intervalle de temps entre deux enregistrements successifs (voir Figure 3-2).

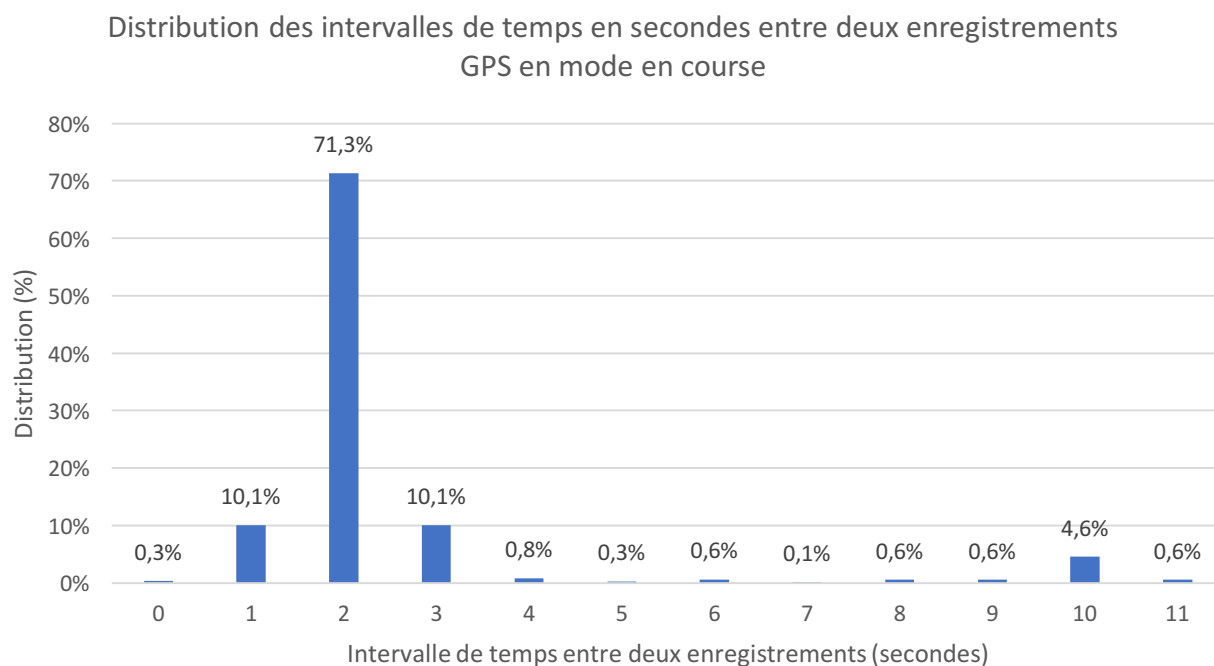


Figure 3-2 : Distribution fréquentielle des intervalles de temps entre deux enregistrements

La distribution fréquentielle démontre que la majorité des intervalles de temps entre deux enregistrements est de deux secondes (77,3 %), suivie par trois secondes (10,1 %) et une seconde (10,1 %). Les intervalles de temps plus élevés représentent tous moins de 1,00 %, sauf pour l'intervalle de temps de dix secondes (4,6 %). La présence élevée d'intervalle de temps de dix secondes s'explique par l'arrêt d'enregistrement en continu des données GPS lorsque le véhicule est immobile. Lorsqu'il y a absence de mouvement, les enregistrements se font aux dix secondes.

Intuitivement, en regardant la Figure 3-2, il semble préférable de choisir un intervalle de temps de 2 secondes, mais cela donne de très mauvais résultats puisque les intervalles de temps ne sont pas réguliers. Le Tableau 3-2 suivant démontre illustre bien ce concept.

Tableau 3-2 : Exemple de la fréquence d'enregistrement des données GPS

Temps (secondes)	Données disponibles	Données disponibles avec une fréquence de 2 secondes
0	X	X
1	X	
2		
3	X	
4		
5	X	
6		
7	X	
8	X	
9		X
10	X	X
11	X	
12		
13	X	
14		
15	X	
16		
17	X	
18		
19	X	

En se fiant au Tableau 3-2, si un intervalle de temps d'une seconde est utilisé, 12 données sur 20 sont disponibles (soit 60% des données), alors que seulement 3 données sur 10 seraient disponibles si un intervalle de 2 secondes était sélectionné (soit 30%). Il a donc fallu interpoler des données entre deux enregistrements consécutifs et ce, afin d'avoir un intervalle de temps régulier d'une seconde. La Figure 3-3 démontre un exemple de ce qui a été fait pour une course.

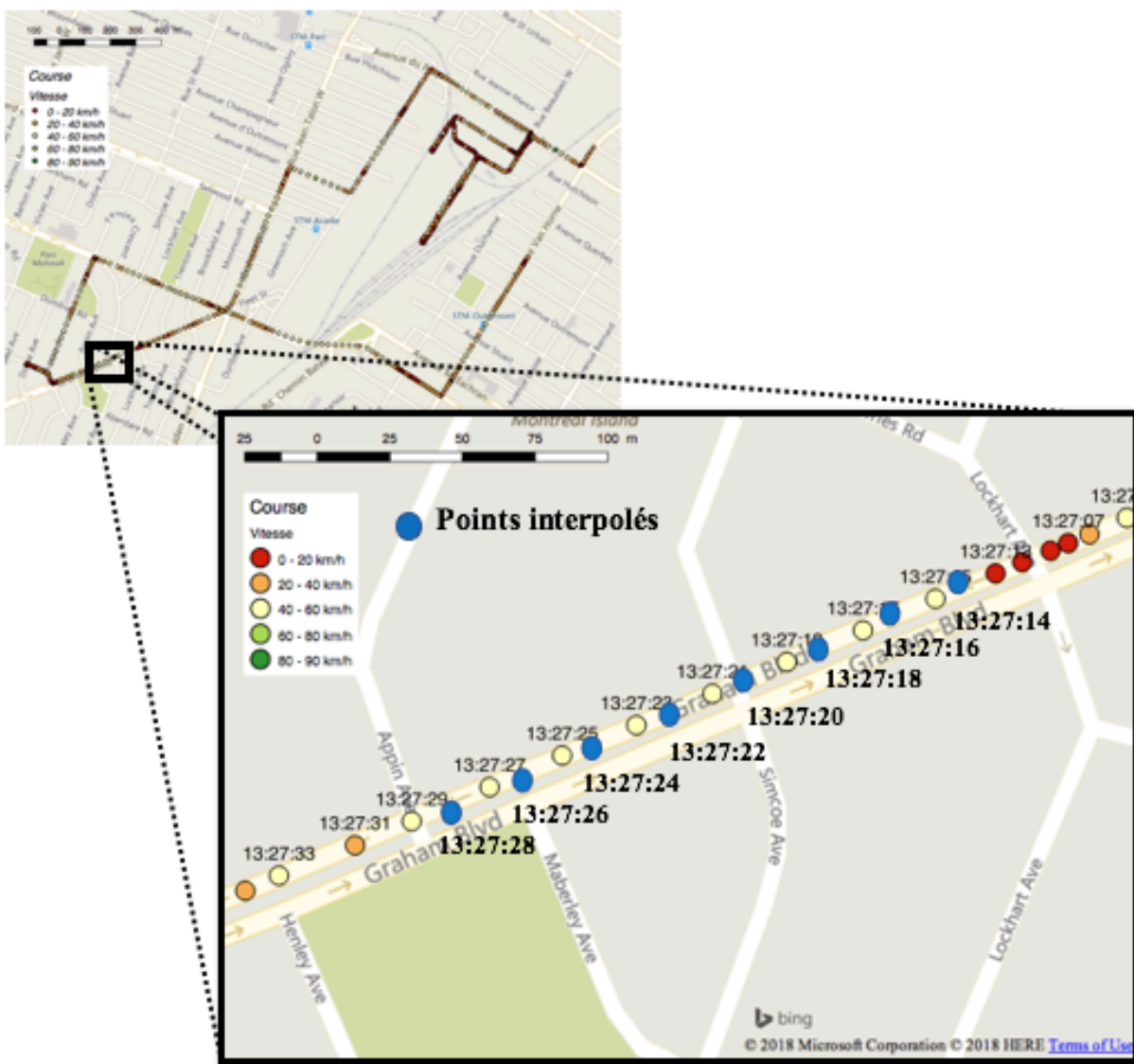


Figure 3-3 : Illustration des points interpolés sur QGIS

Sur la Figure 3-3, il est possible de voir sur la carte du haut, à gauche, la représentation d'une course de taxi sur QGIS. Afin d'obtenir des points à une fréquence d'une seconde, l'interpolation (points bleus sur la carte du bas à droite) doit être fait, tant au niveau horaire qu'au niveau spatial. L'interpolation de la vitesse a été effectuée à partir de toutes les vitesses brutes.

3.1.5 Lissage

Certaines imprécisions au niveau des enregistrements GPS peuvent altérer les données de vitesses et d'accélération, faussant ainsi grandement le calcul de consommation énergétique. Parfois, les vitesses calculées sont de plus 200 km/h avec des accélérations de 25 m/s². Un lissage des données est donc nécessaire. Pour ce faire, différentes techniques existent : retrait des données erronées, lissage simple exponentiel (*simple exponential smoothing*), lissage à l'aide de la méthode du noyau d'Epanechnikov (*Epanechnikov kernel smoothing*), lissage robuste par la méthode du noyau (*robust kernel smoothing*) et lissage robuste simple exponentiel (*robust simple exponential smoothing*). Après avoir testé ces différentes méthodes sur la précision des résultats obtenus, certains auteurs (Rakha, H., Dion, & Sin, 2001) en ont conclu que la méthode de lissage robuste par la méthode du noyau était la meilleure technique de lissage.

La méthode de lissage robuste utilise les mêmes équations que pour la méthode de lissage par la méthode du noyau d'Epanechnikov, mais en supprimant par la suite les données qui sont supérieures aux limites possibles. Voici les équations utilisées (Hellings & Chan, 2002):

$$K(z_{ij}) = \begin{cases} 0,75(1 - z_{ij}^2) & \text{si } z_{ij} \leq 1 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad \text{Équation 3-3}$$

$$z_{ij} = \frac{|i-j|}{\alpha} \quad \text{Équation 3-4}$$

Où

$K(z_{ij})$ = fonction d'estimation de la densité par la méthode du noyau

i : enregistrement central qui est lissé (position 0)

j : position de l'enregistrement par rapport à i auquel un poids sera ajouté pour l'estimation du point i

α = nombre d'enregistrements dans le passé égal à celui dans le futur (amplitude) qui aura un impact sur la valeur à estimer

L'amplitude (α) qui a été choisie est de 3, donc un poids spécifique sera accordé aux deux valeurs qui précèdent et qui suivent la valeur à lisser. Cette valeur a été choisie puisque des auteurs (Rakha, H. et al., 2001) ont démontré que les résultats obtenus avec une largeur de bande égale à trois

étaient ceux qui représentaient le plus les valeurs de vitesses estimées, tout en enlevant les valeurs suspectes. Une fois la valeur de la bande déterminée, il faut appliquer l'équation 3-5 afin de déterminer le poids qui sera accordé aux différentes valeurs qui contribueront au lissage des vitesses :

$$W_{ij} = \frac{K(z_{ij})}{\sum_{k=i-\alpha}^{i+\alpha} K(z_{ik})} \quad \text{Équation 3-5}$$

Où

W_{ij} = poids à accorder à la valeur j pour estimer i

Finalement, la valeur de la vitesse sera estimée en appliquant l'équation 3-6:

$$\hat{S}_i = \sum_{j=i-\alpha}^{i+\alpha} (W_{ij} * S_j) \quad \text{Équation 3-6}$$

Où

S_i = vitesse à estimer

\hat{S}_i = vitesse estimée

Comme mentionné précédemment, la valeur de l'amplitude choisie est de 3. Les différents paramètres calculés sont donc égaux à :

- Pour les valeurs ayant une différence de position égale à 3 ($|i - j| = 3$) par rapport à la vitesse estimée (i) :

$$z_{i-3} = \frac{3}{3} = 1, \text{ donc } k(z_{i-3}) = 0,75 * (1 - 1^2) = 0$$

- Pour les valeurs ayant une différence de position égale à 2 ($|i - j| = 2$) par rapport à la vitesse estimée (i) :

$$z_{i-2} = \frac{2}{3}, \text{ donc } k(z_{i-2}) = 0,75 * \left(1 - \left(\frac{2}{3}\right)^2\right) = 0,4167$$

- Pour les valeurs ayant une différence de position égale à 1 ($|i - j| = 1$) par rapport à la vitesse estimée (i) :

$$z_{i-1} = \frac{1}{3}, \text{ donc } k(z_{i-1}) = 0,75 * \left(1 - \left(\frac{1}{3}\right)^2\right) = 0,6667$$

- Pour les valeurs ayant une différence de position égale à 0 ($|i - j| = 0$) par rapport à la vitesse estimée (i), soit la valeur à estimer elle-même :

$$z_{i-0} = \frac{0}{3}, \text{ donc } k(z_{i-0}) = 0,75 * \left(1 - \frac{0}{3^2}\right) = 0,7500$$

Pour terminer, il ne reste qu'à calculer le poids accordé à chacune des valeurs qui précèdent et qui suivent la valeur à estimer :

- Pour les valeurs ayant une différence de position égale à 0 ($|i - j| = 0$) par rapport à la vitesse estimée (i), soit la valeur à estimer elle-même, le poids à leur accorder est égal à :

$$W_{i-0} = \frac{0,7500}{0,4167 + 0,6667 + 0,7500 + 0,6667 + 0,4167} = 0,2570$$

- Pour les valeurs ayant une différence de position égale à 1 ($|i - j| = 1$) par rapport à la vitesse estimée (i), le poids à leur accorder est égal à :

$$W_{i-1} = \frac{0,6667}{0,4167 + 0,6667 + 0,7500 + 0,6667 + 0,4167} = 0,2285$$

- Pour les valeurs ayant une différence de position égale à 2 ($|i - j| = 2$) par rapport à la vitesse estimée (i), le poids à leur accorder est égal à :

$$W_{i-2} = \frac{0,4167}{0,4167 + 0,6667 + 0,7500 + 0,6667 + 0,4167} = 0,1429$$

- Pour les valeurs ayant une différence de position égale à 3 ($|i - j| = 3$) par rapport à la vitesse estimée (i), le poids à leur accorder est égal à :

$$W_{i-3} = \frac{0}{0,4167 + 0,6667 + 0,7500 + 0,6667 + 0,4167} = 0$$

L'équation finale pour calculer la vitesse est donc l'équation suivante:

$$\hat{S}_t = 0,1429 * S_{t-2} + 0,2285 * S_{t-1} + 0,2570 * S_t + 0,2285 * S_{t+1} + 0,1429 * S_{t+2}$$

Afin de bien illustrer l'impact du choix de l'amplitude, la Figure 3-4 démontre les poids à accorder en fonction du choix de l'amplitude.

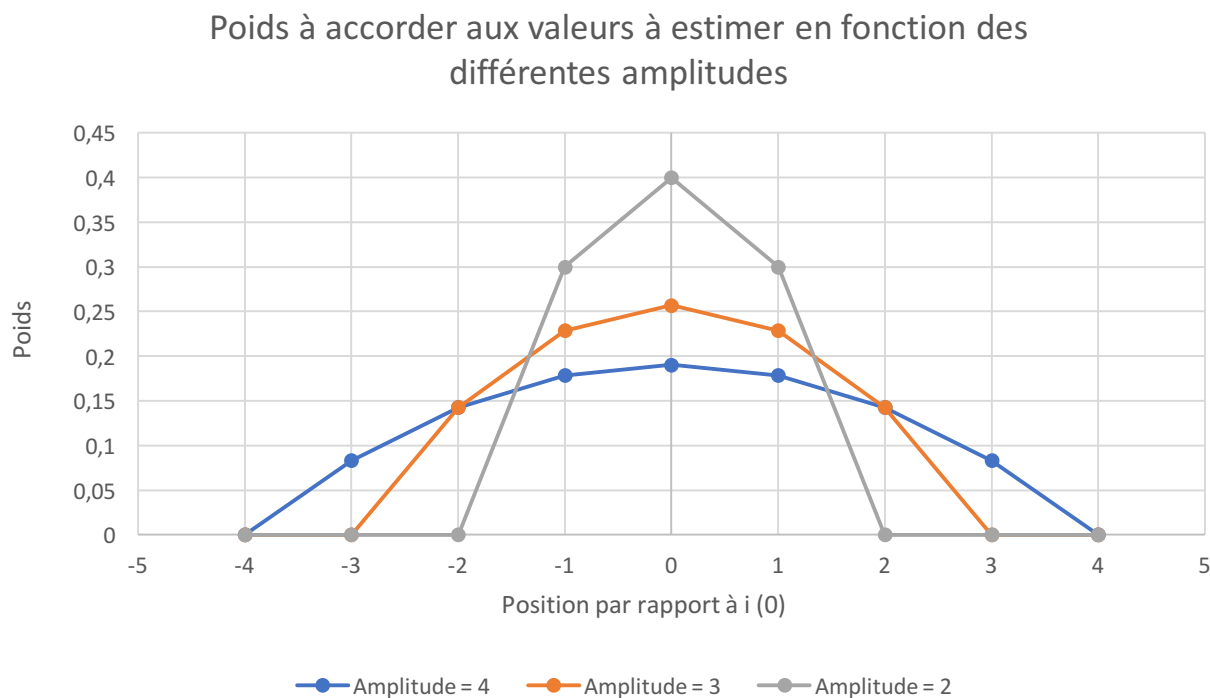


Figure 3-4 : Poids à accorder aux valeurs en fonction de l'amplitude choisie

Puisque la limite de vitesse sur autoroute est de 100 km/h au Québec, les enregistrements qui présentaient des vitesses supérieures à 120 km/h ont été supprimés; une seconde interpolation a ensuite été effectuée au niveau des valeurs supprimées pour que tous les enregistrements aient une valeur de vitesse qui leur soit attribuée. Pour le calcul de l'accélération, l'équation 3-2 a été appliquée une fois les valeurs de vitesses lissées. La Figure 3-5 présente un profil de vitesse avec les valeurs brutes (courbe bleue) et celles obtenues après avoir appliqué la technique de lissage (courbe orangée).

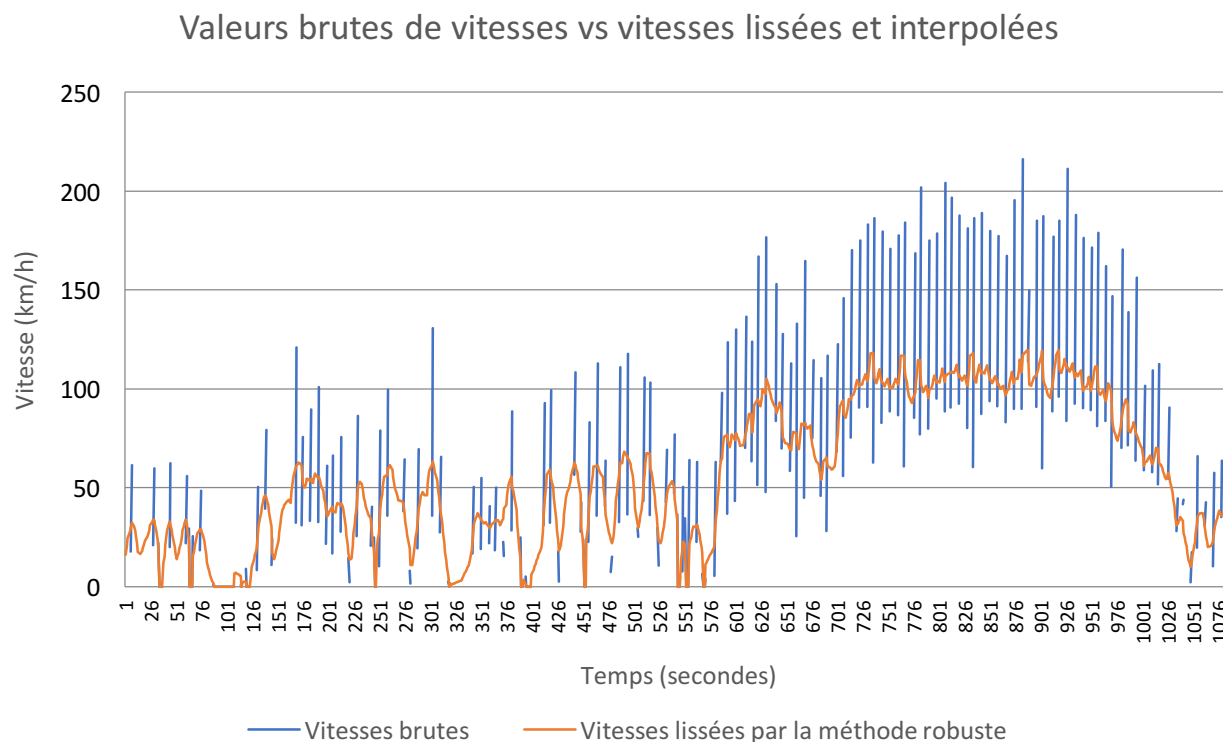


Figure 3-5 : Différence entre les valeurs de vitesses brutes et celles lissées et interpolées

La Figure 3-5 démontre qu'il y a une grande différence entre les valeurs brutes de vitesses et celles lissées et interpolées. Or, il est évident que les valeurs brutes ne représentent pas la réalité puisqu'il y a de fortes variations qui sont physiquement impossibles (une différence de 50 km/h pour un intervalle d'une seconde est mécaniquement impossible pour un véhicule). Ces oscillations peuvent être dues au faible niveau de précision temporel des enregistrements : les données ont une précision à la seconde alors qu'il faudrait au moins une précision au dixième de seconde. Deux enregistrements consécutifs peuvent avoir moins d'une demie seconde de différence, alors qu'elles seront enregistrées en ayant une seconde de différence, ce qui peut avoir un gros impact sur les résultats.

3.1.6 Imposition d'arrêts

Le principal désavantage lors du lissage des données de vitesses est l'empiètement sur les temps d'arrêts puisque les deux valeurs de vitesses qui précèdent et qui suivent la valeur à lisser ont un effet sur cette dernière. Les véhicules peuvent fréquemment être à l'arrêt pendant quelques secondes, mais ces temps d'arrêt sont effacés par le lissage des données. L'imposition des temps

d'arrêts est donc nécessaire : les vitesses lissées supérieures à zéro, associées aux valeurs de vitesses qui étaient égales à zéro avant le lissage des données ont été modifiées pour être elles aussi égales à zéro. Cela engendre des sauts de vitesses parfois très élevés avant et après l'arrêt, mais puisqu'ils sont à peu près égaux de part et d'autre, cela aura peu d'impact sur la consommation énergétique.

3.1.7 Map matching

Afin d'associer les cycles de conduite à des types de segments routiers en particulier, il est primordial de connaître l'emplacement précis des points GPS. Puisque les coordonnées de longitude et de latitude informent peu sur l'emplacement géographique d'un point, un *map matching* est nécessaire. Un fichier de références provenant de « *Open Street Map* » et contenant les différents segments routiers à Montréal a permis d'associer les coordonnées GPS à des noms de segments routiers. Une zone tampon de 15 mètres a été attribuée au *map matching*; le segment routier dans le fichier de références le plus près du point GPS, dans un rayon de 15 mètres, est attribué à ce dernier. Par conséquent, dû à cette zone tampon ainsi qu'à des imprécisions des enregistrements GPS, plusieurs points GPS ont mal été répertoriés ou ne sont tout simplement pas associés à un segment routier. Ce constat a pu être possible grâce à la visualisation d'un échantillon de points GPS dans le logiciel Quantum GIS (QGIS) ; les segments routiers associés aux points GPS n'étaient pas toujours les bons et plusieurs enregistrements sont associés à un segment routier *NULL*. Lorsqu'un enregistrement GPS était couplé à un segment routier, le nom du segment routier en question lui était attribué ainsi que la vitesse affichée sur ce dernier.

3.2 Développement des cycles de conduite

La première étape du développement des cycles de conduite est la collecte de données. Cette étape est, dans le cas présent, équivalente aux étapes énumérées à la section précédente, soit le traitement de données. Dans les prochaines sections, les quatre autres étapes au développement des cycles de conduite sont présentées, soient la génération de micro-segments, la classification des micro-segments, la sélection des critères d'évaluation et la méthode de développement des cycles de conduite.

3.2.1 Génération de micro-segments

Comme mentionné à la section 2.4.2, la seconde étape pour la construction des cycles de conduite, après la collecte de données, est la génération de micro-segments. Puisqu'il a été démontré que la division des cycles de conduite en segment de 250 mètres était la meilleure méthode (Nouri, 2016), cette dernière sera utilisée. Les enregistrements présents dans la table mère ont donc été classés par course et par micro-segment. Une course représente un trajet effectué par un chauffeur, avec un même véhicule, sans avoir un délai supérieur à 30 secondes entre deux enregistrements GPS. Tout comme l'identifiant unique qui a été attribué à chacune des courses, un identifiant a été attribué à chaque micro-segment. Cet identifiant n'est pas unique puisqu'il commence, pour chaque course, par 1. Or, le couple constitué de l'identifiant unique de la course et de l'identifiant du micro-segment forme un couple unique.

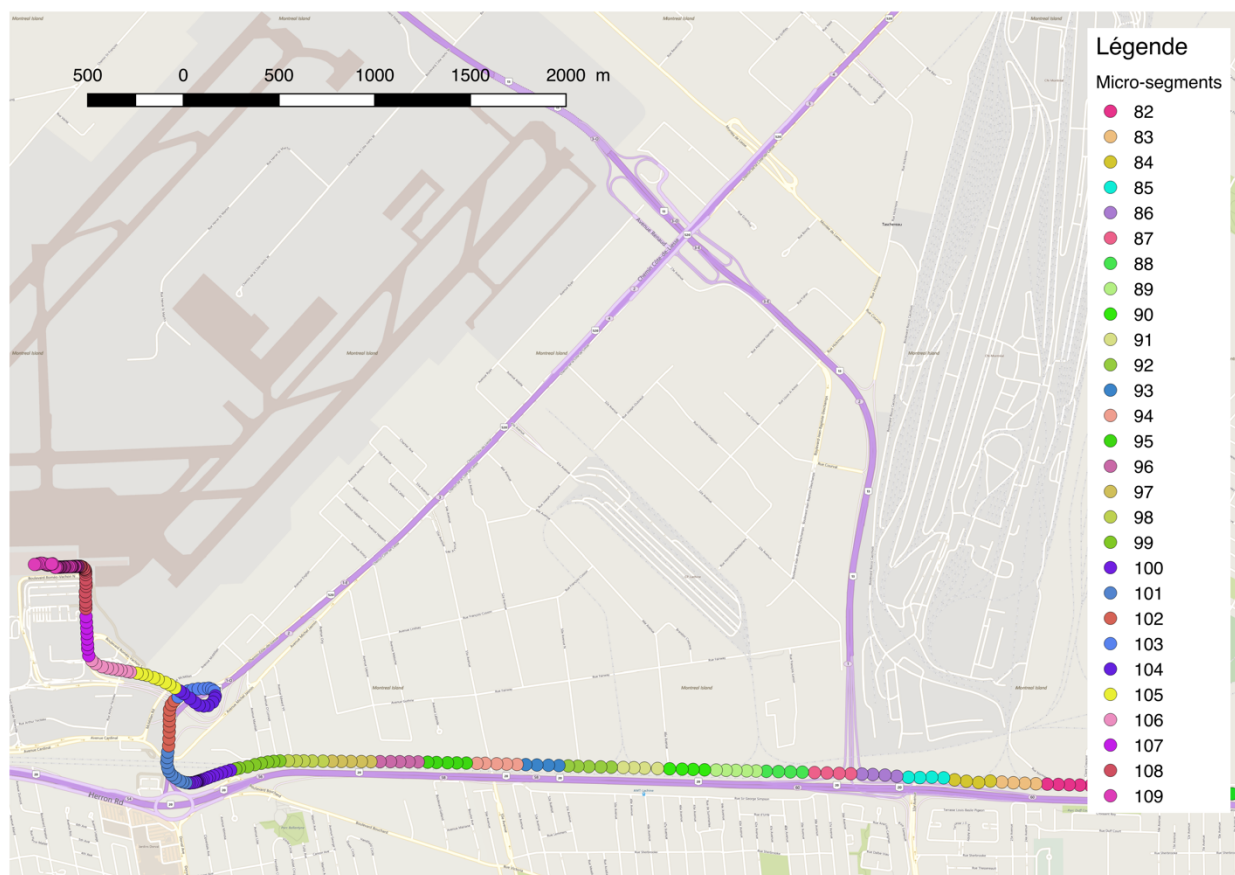


Figure 3-6 : Représentation des micro-segments sur une portion de course

Les nouveaux micro-segments ne commencent pas nécessairement par un multiple de 250 au niveau de la distance, mais ils représentent toujours l'enregistrement qui est le plus près de ce

multiple de 250. Le traitement automatisé de l'attribution des micro-segments a lui aussi été développé dans le cadre de cette recherche et les 197 788 courses présentes dans les tables filles ont toutes été divisées en segments de 250 mètres.

3.2.2 Classification des micro-segments

La troisième étape du développement des cycles de conduite est la classification des micro-segments. Cette étape permettra, au final, de générer différents cycles de conduite en fonction d'une variété de paramètres, afin de comparer les comportements de conduite selon différentes situations. Pour cette troisième étape, les hypothèses suivantes ont dû être posées :

- Les comportements de conduite sont différents en fonction du type de segment routier emprunté dû notamment à la vitesse maximale affichée.
- Les comportements de conduite sont aussi différents en fonction de la journée du déplacement.
 - Il y a des différences de comportements de conduite entre le lundi, le mercredi, le vendredi et le dimanche, qui sont les quatre jours à l'étude.
- Les comportements de conduite sont aussi différents en fonction de l'heure à laquelle le déplacement est effectué.
- Les différences potentielles entre les différents comportements de conduite étudiés ont un impact sur la consommation énergétique des véhicules électriques, dû notamment:
 - Au type de segment routier emprunté;
 - Au jour de la semaine pendant lequel le déplacement est effectué;
 - À l'heure de départ du déplacement;
 - À la combinaison des différentes segmentations effectuées.
- La consommation énergétique moyenne du mardi et du jeudi est similaire à celle du mercredi, alors la consommation énergétique moyenne du samedi est similaire à celle du dimanche.
- La consommation énergétique entre 21h et 4h est similaire à celle de minuit.

3.2.2.1 Classification selon trois types de segments routiers

Pour commencer, différentes courses effectuées par les véhicules de Téo Taxi ont été sélectionnées de façon aléatoire, tout en respectant un certain nombre de conditions. En se basant sur les hypothèses posées précédemment, les comportements de conduite devraient varier en fonction du type de segment routier sur lequel le déplacement est effectué. Il est évident que les comportements de conduite sont différents selon le type de route et il est intéressant d'analyser ces différences. Au total, 3 types de segments routiers ont été sélectionnés en fonction de la vitesse maximale affichée sur ces segments :

- 1- Résidentiels (entre 30 et 40 km/h) ;
- 2- Artères principales (50 km/h) ;
- 3- Autoroutes (100 km/h).

3.2.2.2 Classification selon le jour de la semaine

En second lieu, les courses ont été segmentées en fonction du jour de la semaine. Au total, quatre segmentations ont été effectuées : le lundi, le mercredi, le vendredi et le dimanche. Il est supposé ici que le mercredi est représentatif du mardi et du jeudi, alors que le dimanche est représentatif du samedi. Pour chacune des quatre segmentations journalières, les trois segmentations au niveau du type de segment routier ont aussi été effectuées, pour un total de 12 segmentations. Ces hypothèses de représentativité des jours permettent de diminuer le nombre de cycles de conduite à développer et ainsi réduire de façon importante les temps de calculs. Le développement d'un cycle de conduite à partir de 100 déplacements effectués sur autoroute prend environ 24 heures en termes de temps de calcul.

3.2.2.3 Classification selon l'heure de départ des courses

Ensuite, après avoir été classés en fonction du type de segment routier et du jour de la semaine, les micro-segments ont été divisés en fonction de l'heure de départ de la course, soit entre 5h00 et 20h00, avec des intervalles d'une heure ainsi qu'à minuit. Ces intervalles engendrent donc 17 segmentations horaires. Les 24 heures de la journée n'ont pas été étudiées afin d'alléger la quantité de données à traiter. Il est donc supposé ici que les habitudes de conduite à 20h00 sont représentatives de celles entre 21h00 et 4h00.

Finalement, tous les micro-segments provenant du même type de route, du même jour de la semaine et du même intervalle d'heure de départ ont été regroupés et c'est à partir de ces groupes que la construction des cycles de conduite a débuté (voir Figure 3-7).

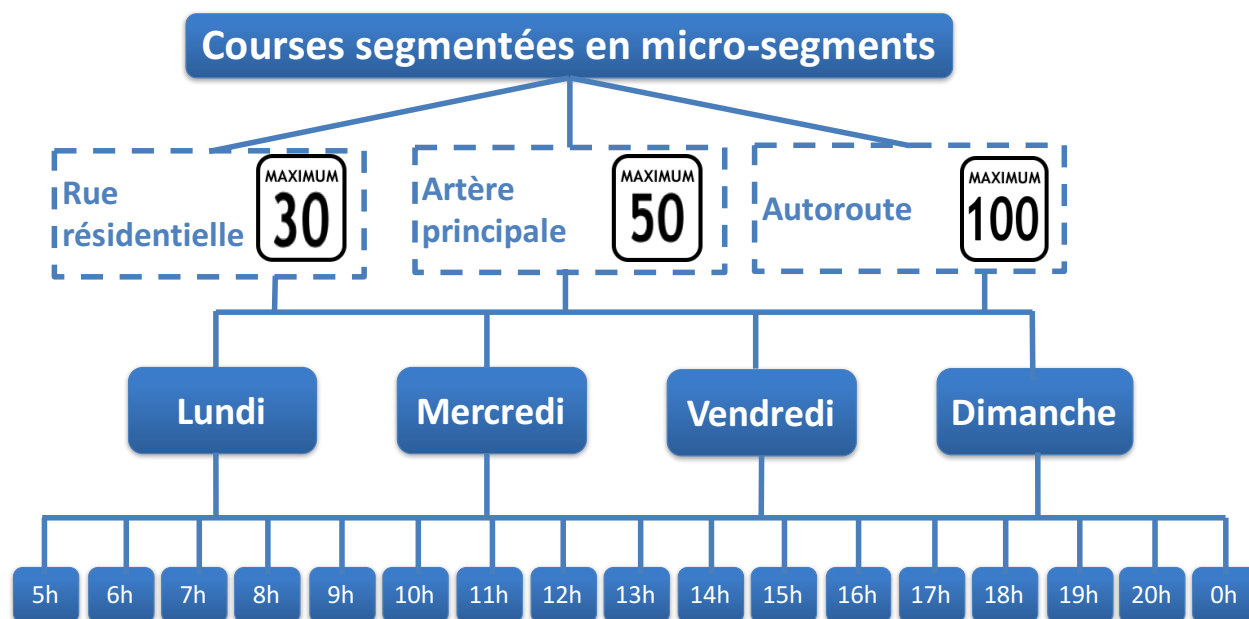


Figure 3-7 : Résumé des segmentations de données pour la construction des cycles de conduite

Il y a donc au total 204 cycles de conduite qui ont été développés, à l'aide de l'algorithme développé en R par Nouri (2016).

3.2.2.4 Sélection des micro-segments

Il est important de mentionner que ce ne sont pas tous les micro-segments appartenant à l'une des 204 classes décrites précédemment qui ont été sélectionnés. L'algorithme utilisé dans R pour le développement des cycles de conduite est très long et complexe donc seule une petite partie des données GPS a été sélectionnée de façon aléatoire. La sélection de base s'est effectuée au niveau de la segmentation en type de segments routiers :

- Rues résidentielles : rue Jeanne-Mance, rue Marquette, rue Rachel, avenue du Mont-Royal et avenue du Parc-Lafontaine. La base de données est composée de 1 142 783 enregistrements GPS, divisés en 58 170 courses.
- Artères principales : rue Sherbrooke et Boulevard St-Joseph. La base de données est composée de 2 173 633 enregistrements GPS, divisés en 56 546 courses.

- Autoroutes : portions des autoroutes 15, 20 et 40 présentes dans la Grande Région de Montréal. La base de données est composée de 5 036 326 enregistrements GPS, divisés en 62 540 courses.

C'est à partir de ces trois nouvelles tables que la segmentation en fonction de la journée et de l'heure de départ s'est effectuée. Il est possible de remarquer que la somme des courses des trois tables donne 177 256 courses, soit 90% de la totalité des courses de la table mère. Or, toutes les courses sélectionnées ont au moins un enregistrement GPS sur les segments routiers énumérés, mais cela ne veut pas nécessairement dire qu'elles génèrent toutes un déplacement acceptable. Les courses qui ont été retenues pour le développement des cycles de conduite sont donc celles ayant le plus de micro-segments effectués sur un même type de segment routier. Par exemple, les courses ayant moins de quatre micro-segments, ce qui signifie que le véhicule a parcouru moins d'un kilomètre sur un même type de segment routier, ont été supprimées de la table. Cela est vrai pour les rues résidentielles et pour les artères principales, alors que le nombre de micro-segments utilisé pour les autoroutes est beaucoup plus élevé, dû notamment à la vitesse élevée, qui engendre le parcours d'une distance plus importante pour un même intervalle de temps. Le nombre de micro-segments sélectionné pour les déplacements sur autoroute dépendait donc de la totalité des points disponibles. La Figure 3-8 démontre le processus de sélection automatisé pour les micro-segments sur autoroute, où i représente le nombre de micro-segments présents sur autoroute pour une même course. La valeur de i commence à 4 afin de s'assurer que la distance minimale parcourue par un véhicule est d'un kilomètre.

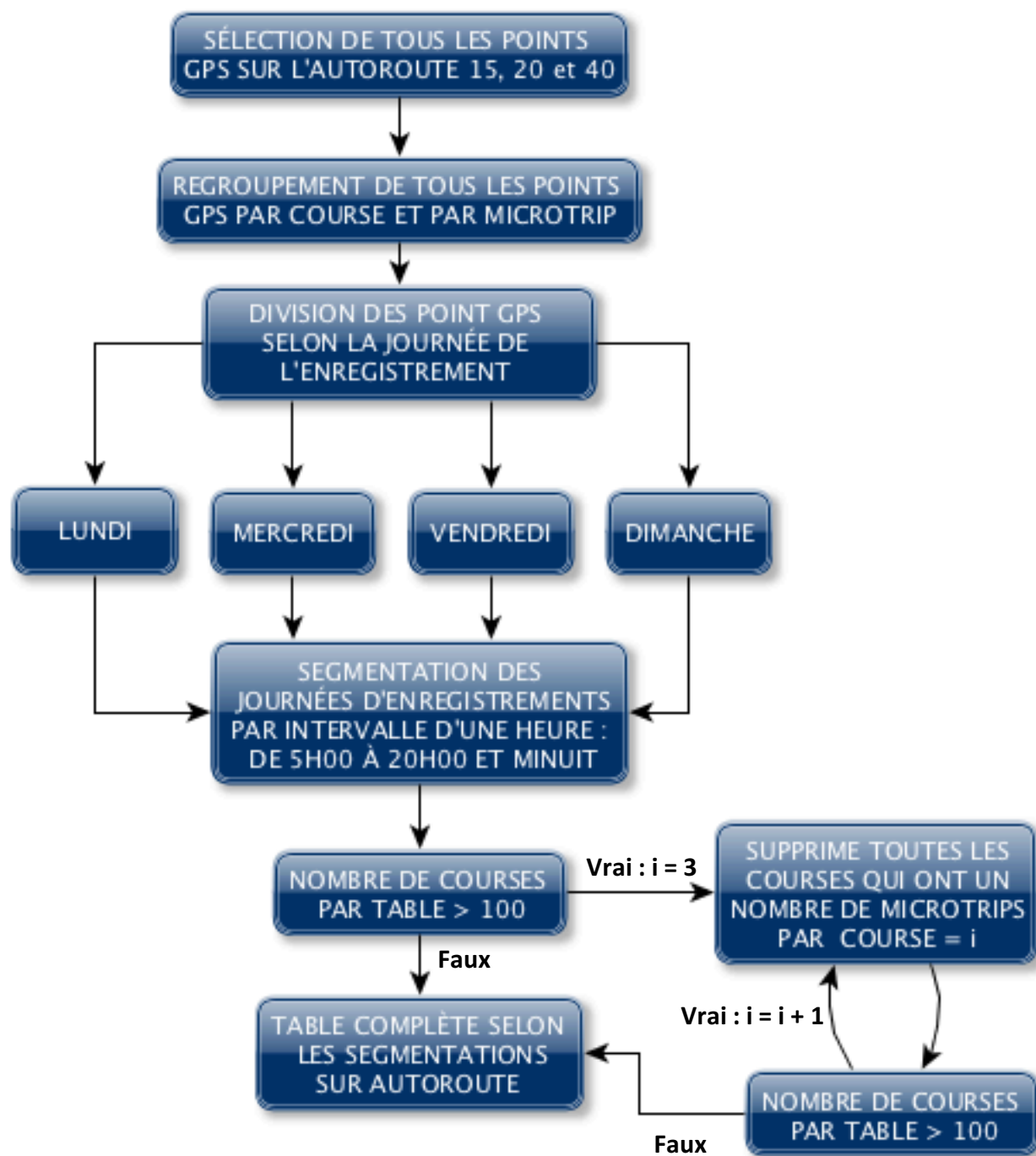


Figure 3-8 : Procédure automatisée pour l'échantillon de courses sur l'autoroute

La quantité de courses totales retenue pour les 204 cycles de conduite développés se retrouve à l'ANNEXE A.

3.2.2.5 Classes de vitesses et d'accélération

Finalement, pour le développement des cycles de conduite, il faut classer chaque vitesse et chaque accélération associées à un point GPS dans différentes classes en fonction de leurs valeurs respectives. Pour les vitesses, les classes sont nommées « vcluster », alors que pour les accélérations, elles sont nommées « acluster ». Voici le classement qui a été fait :

Tableau 3-3 : Classes de vitesses pour les vclusters

vcluster	1	2	3	4	5	6
Vitesse (km/h)	< 20	$20 \leq & < 40$	$40 \leq & < 60$	$60 \leq & < 80$	$80 \leq & < 100$	≥ 100

Tableau 3-4 : Classes d'accélération pour les aclusters

acluster	1	2	3	4	5	6	7
Accélération (m/s^2)	< -1,4	$-1,4 \leq & < -0,6$	$-0,6 \leq & < -0,2$	$-0,2 \leq & < 0,2$	$0,2 \leq & < 0,6$	$0,6 \leq & < 1,4$	$\geq 1,4$

Les classes de vitesses et d'accélération permettent de construire une matrice de distribution des fréquences temporelles de vitesse et d'accélération (provenant de l'anglais *Speed Acceleration time Frequency Distribution*, plus connue sous le nom de matrice SAFD) pour tous les micro-segments présents au sein d'une même base de données ainsi que pour la base de données totale. Le nom matrice SAFD sera utilisé afin d'alléger l'écriture. Voici deux exemples de matrices SAFD (Tableau 3-5 et Tableau 3-6) accompagnées de leurs graphiques respectifs qui permettent de bien représenter la distribution de la fréquence des vitesses et accélérations sur une artère principale un mercredi à 5h00 versus un mercredi à 9h00 (Figure 3-9 et Figure 3-10).

Tableau 3-5 : Matrice SAFD du mercredi à 5h00 sur artère principale

		Accélérations (m/s^2)						
		< -1,4	-1,4 à -0,6	-0,6 à -0,2	-0,2 à 0,2	0,2 à 0,6	0,6 à 1,4	> 1,4
Vitesse (km/h)	0-20	1%	4%	2%	22%	4%	2%	1%
	20-40	1%	6%	4%	3%	3%	5%	2%
	40-60	0%	3%	6%	12%	6%	3%	1%
	60-80	0%	1%	2%	2%	2%	2%	0%
	80-100	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	>100	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

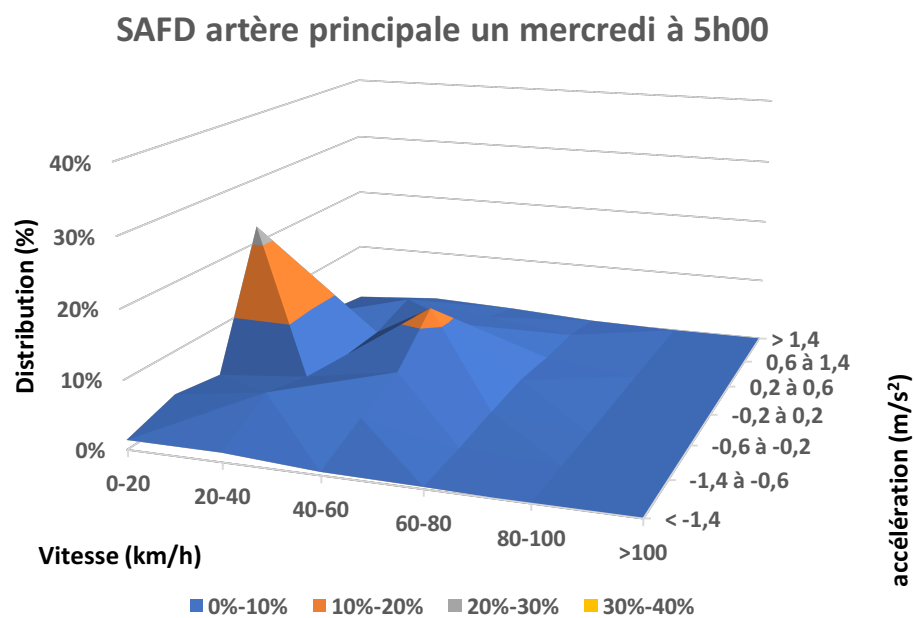


Figure 3-9 : Représentation graphique des valeurs de la matrice SAFD du mercredi à 5h00 sur artère principale

Tableau 3-6 : Matrice SAFD du mercredi à 9h00 sur artère principale

		Accélérations (m/s ²)						
		< -1,4	-1,4 à -0,6	-0,6 à -0,2	-0,2 à 0,2	0,2 à 0,6	0,6 à 1,4	> 1,4
Vitesses (km/h)	0-20	1%	4%	5%	40%	6%	2%	1%
	20-40	1%	4%	4%	5%	4%	4%	1%
	40-60	0%	1%	3%	5%	3%	2%	0%
	60-80	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	80-100	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	>100	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

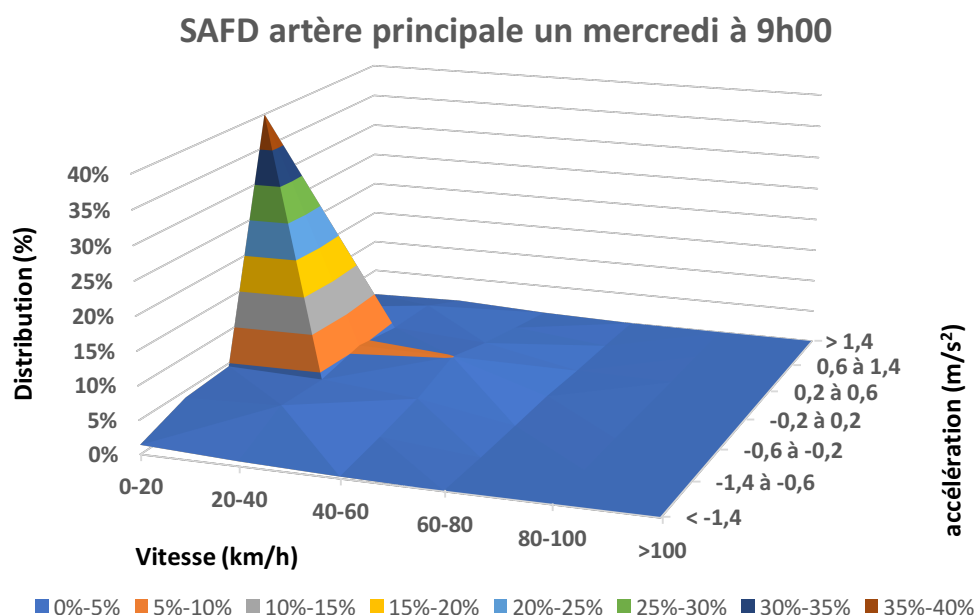


Figure 3-10 : Représentation graphique de la matrice SAFD du mercredi à 9h00 sur artère principale

La comparaison entre les deux matrices démontre bien que la distribution de la fréquence des vitesses est beaucoup moins concentrée à 5h00 qu'à 9h00. Effectivement, 22% des points GPS ont une vitesse entre 0 et 20 km/h et une accélération entre $-0,2$ et $0,2$ m/s² à 5h00 versus 40% pour les point GPS à 9h00, soit près du double. Ce constat pourrait être associé à la densité de la circulation; une circulation moins fluide à 9h00 engendrerait une plus grande concentration de vitesses faibles.

Une fois les matrices SAFD calculées pour chaque micro-segment, elles sont ensuite comparées entre-elles, permettant de construire une matrice de dissemblance (Nouri, 2016). Finalement, l'algorithme des k-médoïdes, qui est un algorithme de partitionnement plus robuste que celui utilisé pour la méthode des k-moyennes au niveau des valeurs aberrantes (Park & Jun, 2009), classe les micro-segments semblables dans différentes catégories, où chacune d'elle représente un comportement de conduite spécifique basé sur la fréquence des vitesses et accélérations. Le nombre de classes déterminé lors de l'utilisation de l'algorithme des k-médoïdes est de sept. Les sept classes sont uniques à leur base de données puisqu'elles dépendent des valeurs de vitesses et d'accélérations. À titre d'exemple, les trois figures suivantes sont des représentations graphiques des matrices SAFD issues de la classe 1, 3 et 7 au sein d'une même base de données, qui illustrent bien les différences. Ces classes représentent sept comportements de conduite distincts.

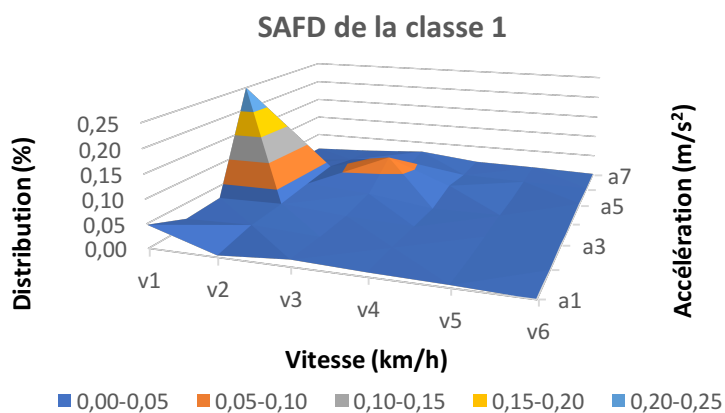


Figure 3-11 : SAFD de la classe 1

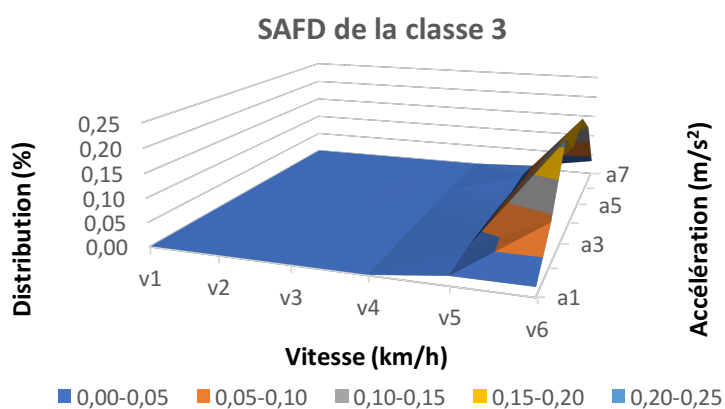


Figure 3-12 : SAFD de la classe 3

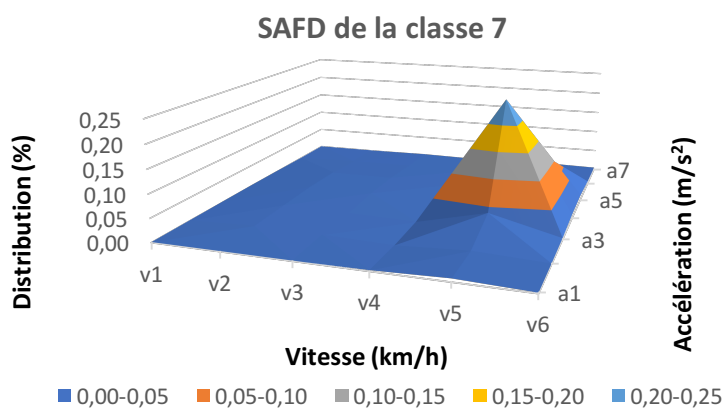


Figure 3-13 : SAFD de la classe 7

3.2.3 Sélection des critères d'évaluation

Les critères d'évaluation permettront de sélectionner, une fois les cycles de conduite développés, celui qui est le plus représentatif de la base de données. Les critères sélectionnés sont les suivants :

Tableau 3-7 : Critères d'évaluation

Numéro	Critères d'évaluation	Unités
1	Différence entre les matrices SAFD	%
2	Vitesse moyenne	km/h
3	Vitesse moyenne sans compter les arrêts	km/h
4	Vitesse maximale	km/h
5	Accélération moyenne de toutes les phases d'accélération	m/s ²
6	Décélération moyenne de toutes les phases de décélération	m/s ²
7	Nombre moyen de changements accélération-décélération	
8	Moyenne quadratique de l'accélération	m/s ²
9	Puissance spécifique du véhicule	kW
10	Proportion des temps d'arrêt (vitesse = 0 m/s)	%
11	Proportion des temps d'accélération (accélération $\geq 0,1$ m/s ²)	%
12	Proportion des temps de décélération (décélération $\leq -0,1$ m/s ²)	%
13	Proportion des temps de croisière (vitesse > 5 m/s et $-0,1$ m/s ² $<$ accélération $< 0,1$ m/s ²)	%
14	Proportion des temps de rampe (vitesse < 5 m/s et $-0,1$ m/s ² $<$ accélération $< 0,1$ m/s ²)	%

La moyenne quadratique de l'accélération représente la somme de toutes les valeurs d'accélération au carré (qu'elle soit positive ou négative), divisée par le nombre d'enregistrements total (ce qui est équivalent au temps total en secondes). La puissance spécifique du véhicule (de l'anglais

Véhicule Specific Power ou VSP) est calculée à l'aide de la formule suivante (Ashtari, Bibeau, & Shahidinejad, 2012):

$$\begin{cases} (86,3 * v_t + 0,0456 * v_t^3 + 317(v_t - v_{t-1})v_t) * 0,001 & \text{si } v_t > v_{t-1} \\ (86,3 * v_t + 0,0459 * v_t^3) * 0,001 & \text{si } v_t \leq v_{t-1} \end{cases} \quad \text{Équation 3-7}$$

Où v_t est la vitesse au temps t .

Finalement, la proportion des temps de rampe (de l'anglais *creeping*) fait référence aux instants lors desquels le véhicule n'a pas une vitesse assez élevée pour considérer qu'il est en vitesse de croisière, mais qu'il n'a pas une accélération ou une décélération prononcée. Ces 14 critères ont été calculés pour chacune des bases de données et serviront de valeurs cibles lors du développement des cycles de conduite.

3.2.4 Le développement des cycles de conduite

Au final, la base de données initiale utilisée pour la construction des cycles de conduite dans le logiciel R contient les champs suivants : clé unique de l'enregistrement (uid), temps en secondes (tim), distance cumulative en mètres (disttot), vitesse en km/h (speedkm), accélération en m/s^2 (acc), numéro de course (tour), classe de vitesse (vcluster), classe d'accélération (acluster) et numéro du micro-segment (mid_250). L'algorithme du développement des cycles de conduite est basé sur le processus des chaînes de Markov. Ce dernier porte sur la probabilité que différentes classes de micro-segments surviennent en succession et ces probabilités forment une matrice de transition (Nouri, 2016). Les micro-segments sont donc ajoutés un à un, basés sur la matrice de transition, jusqu'à ce que la moyenne de la durée des courses au sein d'une même base de données soit atteinte. Il est important de rappeler qu'une base de données signifie la totalité des déplacements qui ont été sélectionnées suite à la segmentation des données présentée précédemment. Ce processus a donc été effectué pour les 204 tables.

Le Tableau 3-8 représente la séquence de probabilités d'ajouts des micro-segments les uns à la suite des autres au sein d'une même base de données. Les sept classes présentées sont le résultat de l'algorithme des k-médoïdes. Au départ, le premier micro-segment de l'une des courses présente dans la base de données est sélectionné. Ce premier micro-segment est associé à l'une des sept classes et le micro-segment qui suivra ce premier micro-segment sera sélectionné en fonction de la probabilité qu'une certaine classe suive la précédente. Tous les micro-segments appartenant à cette

seconde classe et ayant une différence de vitesse de 2 km/h et moins avec le premier micro-segment sont filtrés et ils sont ajoutés un à un à la suite du premier micro-segment. Ensuite, les 14 critères de sélections sont calculés lors de l'ajout d'un micro-segment. Le couple formé par les deux micro-segments qui présente les 14 critères de sélection les plus représentatif des 14 critères de sélection calculés pour la base de données est sélectionné. Seuls les micro-segments ayant une vitesse initiale de plus ou moins 2 km/h avec la vitesse finale du micro-segment précédent sont filtrés afin d'assurer une certaine fluidité entre deux micro-segments. Le second micro-segment, faisant partie d'une certaine classe, a lui aussi des probabilités précises d'être suivie par un micro-segment des autres classes. Les micro-segments présents dans la classe ayant la plus forte probabilité de suivre le micro-segment précédent sont sélectionnés et filtrés. Ce processus continue jusqu'à ce que le temps désiré soit atteint, soit le temps moyen en secondes de toutes les courses présentes dans la base de données. La Figure 3-14 démontre un exemple du processus de sélection à partir de la classe 2.

Tableau 3-8 : Probabilité que différentes situations surviennent en succession (chaînes de Markov)

	Fin	CL_1	CL_2	CL_3	CL_4	CL_5	CL_6	CL_7
Début	0%	17%	22%	11%	33%	6%	6%	6%
CL_1	14%	7%	21%	7%	7%	29%	14%	0%
CL_2	10%	0%	39%	10%	16%	0%	23%	3%
CL_3	24%	8%	12%	8%	8%	24%	16%	0%
CL_4	14%	23%	18%	9%	14%	9%	5%	9%
CL_5	0%	3%	0%	19%	3%	29%	19%	26%
CL_6	12%	4%	15%	35%	8%	12%	8%	8%
CL_7	6%	6%	6%	0%	11%	33%	17%	22%



Figure 3-14 : Probabilités que certaines classes précèdent ou suivent la classe 2

Pour chacune des bases de données, un nombre de cycles de conduite égal au nombre de courses présentes dans la base de données a été développé et la procédure automatisée de classement des cycles de conduite, développée dans le cadre de cette recherche, permet de sélectionner celui qui est le plus représentatif des comportements de conduite totaux de la base de données et cela pour chacune des 204 bases de données. Cette procédure compare les 14 critères d'évaluation obtenus pour chacun des cycles de conduite avec les critères d'évaluation cibles de la base de données. Elle octroie ensuite un rang à tous les cycles de conduite individuellement pour chacun des 14 critères en fonction de la différence entre les valeurs obtenues et les valeurs cibles. Le cycle de conduite ayant la plus petite différence pour l'un des critères obtient le rang 1 pour ce critère et la plus petite somme de tous les rangs pour les 14 critères d'évaluation permet de sélectionner le cycle de conduite le plus représentatif. Le numéro du cycle de conduite qui représente le plus les comportements de conduite de la base de données totale est finalement inscrit dans un fichier Excel. Voici un petit schéma qui résume bien la méthodologie suivie pour le développement des cycles de conduite (Figure 3-15) :

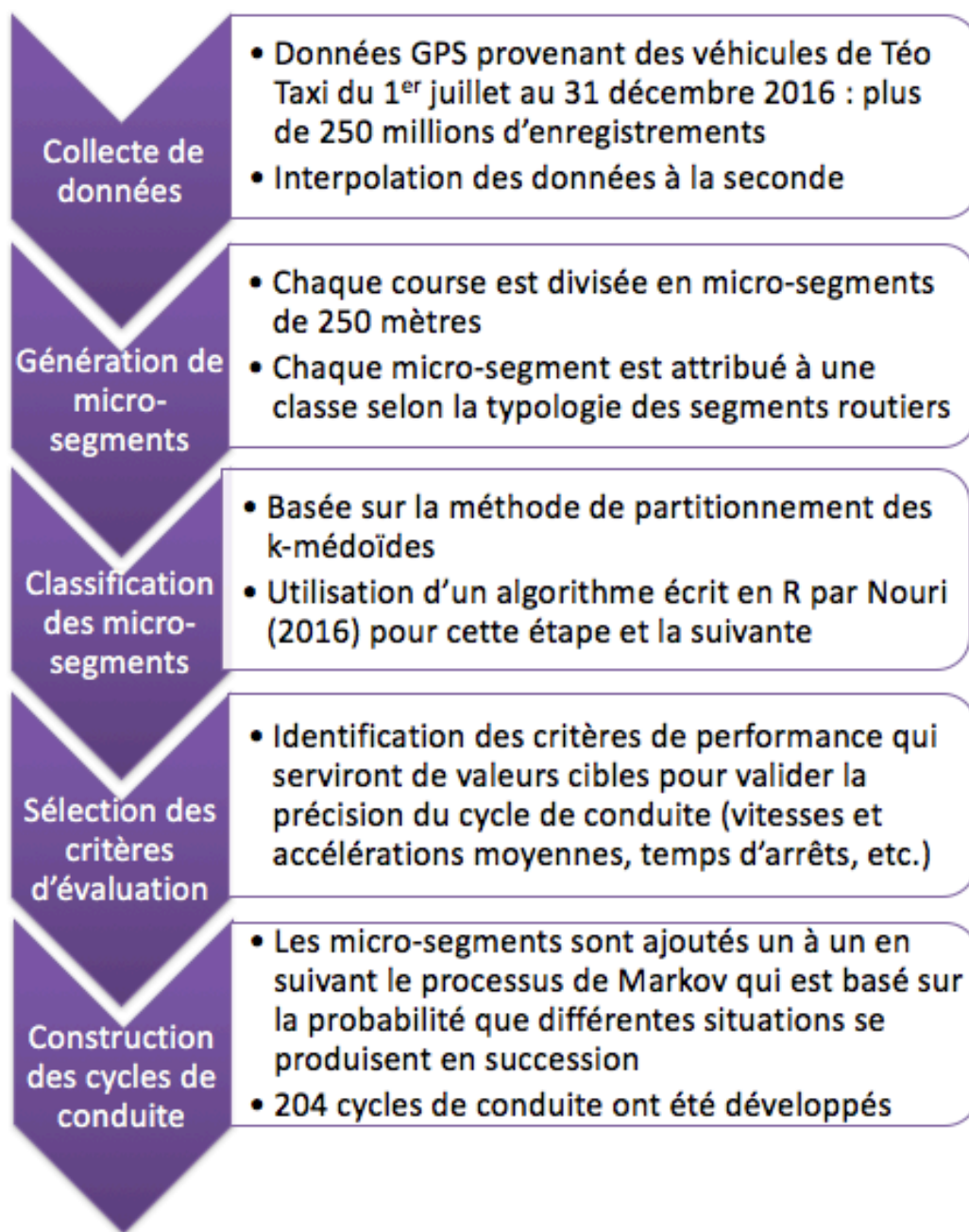


Figure 3-15 : Résumé du mécanisme de développement des cycles de conduite

Les 204 cycles de conduite développés permettront d'alimenter le modèle de consommation énergétique afin de pouvoir conclure sur les hypothèses posées. Les résultats des cycles de conduite et de la consommation issus de ces derniers sont présentés au chapitre suivant.

3.3 Traitement de données pour les données de consommation énergétique

3.3.1 Données brutes

Pour l'analyse des données de consommation énergétique des véhicules électriques, une base de données différente de celle utilisée pour les cycles de conduite a été fournie par Taxelco. Dans cette base de données, il y a au total 270 736 données brutes, soit 6 082 données entre le 15 octobre 2015 et le 31 décembre 2015, 161 131 données entre le 1^{er} janvier 2016 et le 31 décembre 2016 et 103 523 données entre le 1^{er} janvier 2017 et le 5 mai 2017. Il y a plusieurs champs présents, décrivant les activités et la consommation énergétique de différents véhicules. Voici la description des différents champs (voir Tableau 3-9). Les valeurs du champ « *Charge Depeleting Distance (km)* » sont toujours égales à la distance du déplacement et les valeurs du champ et « *EV Fraction (%)* » sont toujours égales à 100%. Ces champs n'ont donc aucune influence au sein de la base de données.

Tableau 3-9 : Champs présents dans la base de données de consommation énergétique

Champ	Définition
IVehicle Unit	Identifiant du véhicule
Véhicule Licence	Licence du véhicule
Vehicle Make	Marque du véhicule
Vehicle Model	Modèle du véhicule
Véhicule Year	Année du véhicule
Device ID	Identifiant du dispositif d'enregistrement des données
TripID	Identifiant unique des activités du véhicule
Start Date	Début de l'activité (jj/mm/aaaa hh:mm:ss AM/PM)
End Date	Fin de l'activité (jj/mm/aaaa hh:mm:ss AM/PM)
Duration	Durée de l'activité (hh:mm:ss)
Trip Distance (km)	Distance parcourue en kilomètres
Charge Depeleting Distance (km)	Distance parcourue en kilomètres pour laquelle il y a eu une consommation énergétique de la charge
Fuel Consumed (L)	Quantité d'essence consommée en Litres
Fuel Consumption (LPer100Km)	Consommation d'essence en L/100 km
Electricity Consumed (kWh)	Électricité consommée en kWh
Total Energy Comsumption (LPer100kmEquiv)	Consommation totale d'énergie en L/100 km équivalent
Start SOC	Niveau de charge de la batterie au départ
End SOC	Niveau de charge de la batterie à la fin
Ambient Temperature (Celcius)	Température ambiante en degré Celsius
Average Speed (KPH)	Vitesse moyenne en km/h
Max Speed (KPH)	Vitesse maximale en km/h
EV Fraction (%)	Pourcentage de l'utilisation du véhicule électrique
Auxiliary Load (KW)	Utilisation des auxiliaires en kW
% Hard Acceleration	Pourcentage de fortes accélérations
% Hard Braking	Pourcentages de forts freinages
Eco Driving Score	Pointage de conduite économique
% Time Idle	Pourcentage du temps à l'arrêt
Number of Idle Events	Nombre d'événements à l'arrêt
Odometer	Kilométrage du véhicule en kilomètres
Idle Time (hours)	Temps à l'arrêt en heures (hh:mm:ss)
Driving Time (hours)	Temps de conduite en heures (hh:mm:ss)

Grâce à ces informations, il est possible de faire un croisement entre ces données et les données GPS afin de faire un suivi des activités d'un véhicule lors d'une certaine période d'utilisation. Puisque les données GPS sont disponibles seulement pour la période de juillet à décembre 2016, le suivi des véhicules a essentiellement été effectué sur cette période.

3.3.2 Croisement entre les données de consommation et les données GPS

Dans la base de données de consommation énergétique des véhicules électriques, chaque ligne correspond à une période d'activité (TripID) incluant les informations présentées au Tableau 3-9. Pour la période de juillet à décembre 2016, il y a 106 947 activités reportées et 81 323 de ces dernières ont pu être croisées avec les données GPS, soit 77% de la base de données. Cette perte est explicable notamment par un certain manque de données GPS reliées à la période d'activités (parfois moins de 50% de la durée totale de l'activité). Ainsi, plusieurs périodes d'activités ont été supprimées de la base de données. Afin d'obtenir des croisements très similaires entre les point GPS et l'information fournie par les données de consommation énergétique, la différence de temps qui a été considérée comme étant acceptable pour garder les données est de $\pm 00:00:10$ (± 10 secondes) entre les données de consommation énergétique et les données GPS qui les représentent. De plus, un calcul de la distance parcourue des données GPS a été effectué afin de vérifier si elle concordait avec la distance parcourue des données de consommation. Une différence de $\pm 2\%$ entre les deux bases de données a été considérée comme acceptable et seules ces données ont été conservées. Finalement, pour les temps de conduite (excluant les arrêts) inférieurs à 9 minutes, les données ont été elles aussi supprimées. La Figure 3-16 démontre le processus de sélection.

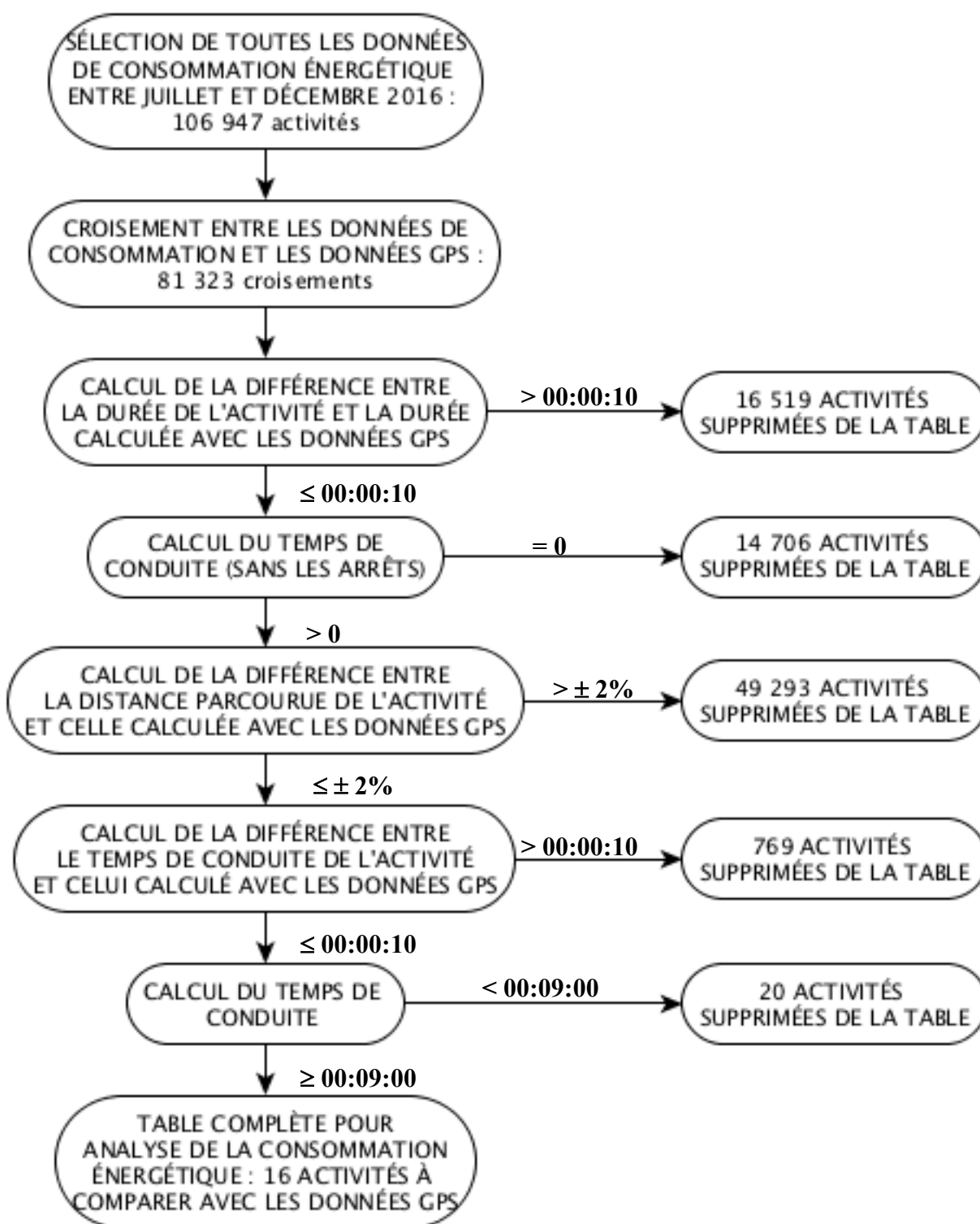


Figure 3-16 : Processus de sélection des activités reportées

Finalement, seulement 16 périodes d'activités (soit 0,015% de la base de données initiale) ont rempli les critères énumérés précédemment et c'est à partir de ces périodes d'activités que les analyses de consommation énergétique sont effectuées. Le Tableau 3-10 présente les 16 courses qui ont été retenues et les valeurs de quelques-uns de leurs champs.

Tableau 3-10 : Valeurs des données de consommation, des données GPS croisées et de la différence entre les deux

Numéro unique de l'activité	Valeurs provenant des données de consommation			Valeurs provenant des données GPS			Comparaison entre les données de consommation et les données GPS		
	Durée	Dist. (km)	Temps de conduite	Durée	Dist. (km)	Temps de conduite	Diff. de durée	Diff. de dist. (%)	Diff. temps de conduite
5084118	01:39:38	29,4	01:06:00	01:39:40	28,9	01:05:54	00:00:02	1,5%	00:00:06
4324991	03:29:19	40,6	01:58:48	03:29:20	40,4	01:58:40	00:00:01	0,4%	00:00:08
4651996	02:56:14	45,1	01:47:24	02:56:07	45,0	01:47:16	00:00:07	0,1%	00:00:08
4944620	01:50:01	20,4	00:54:36	01:50:03	20,1	00:54:37	00:00:02	1,3%	00:00:01
4148215	00:16:37	4,9	00:12:36	00:16:42	4,9	00:12:38	00:00:05	-0,2%	00:00:02
3812429	00:33:47	8,0	00:20:24	00:33:48	7,9	00:20:31	00:00:01	1,5%	00:00:07
4645237	01:51:28	35,0	01:10:12	01:51:24	35,0	01:10:05	00:00:04	0,0%	00:00:07
4404642	01:21:59	18,3	00:47:24	01:22:01	18,5	00:47:17	00:00:02	-1,2%	00:00:07
5056319	01:58:57	22,5	00:51:00	01:58:52	22,4	00:50:53	00:00:05	0,2%	00:00:07
3819123	00:43:12	11,6	00:29:24	00:43:13	11,7	00:29:16	00:00:01	-1,0%	00:00:08
4121865	00:13:47	3,9	00:09:00	00:13:49	3,9	00:09:02	00:00:02	0,1%	00:00:02
4598942	02:18:39	14,6	00:36:36	02:18:34	14,7	00:36:32	00:00:05	-1,0%	00:00:04
4286064	00:17:16	3,9	00:10:48	00:17:22	3,9	00:10:56	00:00:06	-1,7%	00:00:08
4301528	02:07:06	43,1	01:27:36	02:07:12	43,0	01:27:28	00:00:06	0,4%	00:00:08
4506378	01:12:06	16,8	00:33:36	01:12:07	16,9	00:33:40	00:00:01	-1,2%	00:00:04
5001952	03:44:24	62,5	02:09:00	03:44:30	62,5	02:09:06	00:00:06	0,1%	00:00:06

Toutes les valeurs inscrites au Tableau 3-10 respectent les critères de sélection présentés à la Figure 3-16. Il est important de mentionner que lors du croisement avec les données rapportées de consommation, les enregistrements GPS qui ont été utilisés sont ceux provenant des valeurs brutes. Ce choix a peu d'influence sur les résultats obtenus puisque la durée de l'activité, la distance parcourue et le temps de conduite sont des paramètres qui ne sont pas affectés par le traitement de données. Cependant, si la vitesse moyenne avait été un critère de sélection, il aurait peut-être fallu

comparer les résultats obtenus entre l'utilisation des données GPS brutes et celles traitées. Pour le calcul de consommation énergétique, les enregistrements GPS reliés aux 16 périodes d'activités ont été traités à partir de la même méthode décrite à la section 3.1. Les périodes d'activités ne sont pas nécessairement reliées à des périodes lors desquelles le chauffeur est en course et c'est la raison pour laquelle certaines données n'avaient pas encore été traitées.

3.4 Estimation de la consommation énergétique des véhicules électriques

Voici un rappel des formules utilisées pour l'estimation de la puissance instantanée ($P(t)$ en W) et de l'énergie consommée et produite (E en Wh), soient les équations 2-1 et 2-3 :

$$P(t) = (M * a(t) + \frac{1}{2} * \rho * C_D * A_f * v(t)^2 + M * g * \Delta h(t) + f_{ri} * M * g) * v(t)$$

$$E = \int_0^t P(t) dt$$

Afin de calculer la puissance instantanée et l'énergie consommée et produite, un tableur Excel a été créé. Ce tableur permet de calculer de façon automatique la consommation énergétique dès que les données entrantes nécessaires y sont insérées. Pour le calcul de la consommation énergétique des cycles de conduite, seules les valeurs de vitesses sont nécessaires. L'élévation est alors paramétrée comme étant égale à zéro. Pour le calcul de la consommation énergétique des courses précises présentées au Tableau 3-10, l'élévation a été ajoutée ainsi que la distance entre deux enregistrements puisque dans ce cas, elle est connue.

3.4.1 Les paramètres fixes

La première étape pour le calcul de la consommation énergétique résultante d'un cycle de conduite est d'attribuer une valeur aux différents paramètres qui restent fixes dans la formule de consommation. Les paramètres fixes sont la masse du véhicule (M en kg), la densité de l'air (ρ en kg/m^3), le coefficient de la résistance de l'air (C_D sans unité), l'aire frontale du véhicule électrique (A_f en m^2), la constante de la force gravitationnelle (g en m/s^2) et le coefficient de résistance au mouvement (f_{ri} sans unité). Lorsque le calcul de consommation se fait pour les données GPS croisées aux données rapportées de consommation, la masse et l'aire frontale du véhicule dépendent évidemment du véhicule qui est à l'étude, alors qu'elle est arbitraire pour le calcul de consommation des cycles de conduite (une seule valeur de masse et d'aire frontale sont utilisées).

Les autres paramètres fixes dépendent des conditions extérieures. La précision des valeurs a peu d'importance au niveau des cycles de conduite; l'important est que les valeurs utilisées soient les mêmes dans tous les cas afin que la comparaison entre les cycles soit valable. Voici les valeurs qui ont été déterminées, tirées en partie de la littérature :

- $\rho = 1,2256 \text{ kg/m}^3$ (Fiori et al., 2016)
- $C_D = 0,28$ (Fiori et al., 2016)
- $g = 9,8066 \text{ m/s}^2$ (Fiori et al., 2016)
- $f_{ri} = 0,02$ (Engineering ToolBox, 2008)

Au niveau de la masse et de l'aire frontale du véhicule, les valeurs utilisées sont les suivantes pour les deux modèles de Tesla, pour la Nissan Leaf et pour la Kia Soul respectivement (Guide de l'auto, 2018c), (Guide de l'auto, 2018b), (Guide de l'auto, 2018a) :

Tableau 3-11 : Valeurs utilisées pour la masse et l'aire frontale des différents modèles de véhicules

	Tesla SD	Tesla XD	Nissan Leaf	Kia Soul
Masse (kg)	2205	2112	1447	1476
Aire frontale (m²)	2,41	2,41	2,33	2,44

Les masses des véhicules présentées au Tableau 3-11 ne prennent pas en considération la masse des passagers, des différents objets présents dans le véhicule (valises, sacs d'épicerie, poussettes, etc.) ainsi que la masse du panneau de taxi installé sur le toit. Malheureusement, ces masses sont très difficiles à estimer puisque les renseignements concernant le poids des chauffeurs et le nombre de passagers dans le taxi ne sont pas disponibles. Une valeur de 150 kg a donc été ajoutée aux valeurs présentées au Tableau 3-11. Pour l'estimation de la consommation énergétique issue des cycles de conduite, une valeur moyenne de 1600 kg a été utilisée pour représenter la masse du véhicule.

L'aire frontale est aussi un paramètre difficile à estimer puisque que cette dernière n'est pas fournie dans les fiches techniques des différents véhicules. Or, les dimensions des véhicules sont disponibles et il est possible d'estimer l'aire frontale en utilisant l'équation suivante (Rakha, H. A., Ahn, Moran, Sacerens, & Van den Bulck, 2011) :

$$\text{Aire frontale (m}^2\text{)} = 0,85 * \text{hauteur} * \text{largeur} \quad \text{Équation 3-8}$$

C'est en appliquant l'équation 3-8 que les valeurs présentées au Tableau 3-11 ont pu être calculées.

3.4.2 Les paramètres variables

L'équation 2-1 permet de calculer la puissance instantanée en watt, qui dépend des valeurs de vitesses instantanées ($v(t)$ en m/s), d'accélération ($a(t)$ en m/s^2) et de la différence d'élévation par seconde (soit $\Delta h(t)$ en mètre) à l'instant t ($\Delta h=0$ pour les cycles de conduite). Un algorithme écrit en langage Python a permis de déterminer l'élévation des point GPS. Ces élévations proviennent d'une interface de programmation applicative fournie gratuitement par le Gouvernement du Canada. Ces valeurs ont été interpolées de façon linéaire à une fréquence d'une seconde lorsqu'elles sont manquantes ; la puissance instantanée peut donc être estimée à chaque seconde.

3.4.3 Efficacité du moteur électrique, de la transmission et des freins régénératifs

Avant de calculer l'énergie à l'aide de l'équation 2-3, il faut ajuster les valeurs obtenues de puissance selon l'efficacité du moteur électrique, de la transmission et des freins régénératifs. Ces valeurs sont très difficiles à estimer; les valeurs utilisées dans le cadre de cette recherche se basent sur des travaux qui ont déjà été effectués sur le sujet (Fiori et al., 2016). Les équations et les valeurs présentées dans cet article sont applicables pour la Nissan Leaf seulement, mais elles seront utilisées aussi pour la Kia Soul et les deux modèles de Tesla dû au manque d'informations pour ces véhicules. La valeur d'efficacité de la transmission utilisée est donc égale à 92%, celle du moteur électrique égale à 91% et voici l'équation appliquée dans le cadre de cette recherche pour estimer l'efficacité instantanée des freins régénératifs (Fiori et al., 2016) :

$$P(t) = P(t) * n_{rb} \quad P(t) < 0 \quad \text{Équation 3-9}$$

Où

$$n_{rb}(t) = \begin{cases} \left[e^{\left(\frac{0,0411}{|a(t)|} \right)} \right]^{-1} & a(t) < 0 \\ 0 & a(t) \geq 0 \end{cases} \quad \text{Équation 3-10}$$

Au final, l'équation 3-9 est donc multipliée par 92% (ajustement dû à l'efficacité de la transmission), par 91% (ajustement dû à l'efficacité du moteur électrique) et par la valeur de n_{rb} lorsque la valeur de la puissance est négative. Finalement, l'intégrale du résultat de la puissance

entre le temps 0 et le temps t est calculée (équation 2-3) pour obtenir l'énergie totale consommée par le véhicule en kilowattheure.

3.4.4 Procédure automatisée

Afin d'estimer rapidement la consommation énergétique d'un véhicule sur une certaine période de temps, une procédure automatisée a été créée dans un tableur Excel. Il suffit d'insérer les valeurs de vitesses en km/h ou en m/s (selon les valeurs disponibles) ainsi que la distance et l'élévation ou tout simplement la valeur de l'angle de la pente en degré et l'énergie en kWh est automatiquement calculée. Cet outil est indispensable dans le cadre de cette recherche puisque le calcul de l'estimation de la consommation énergétique sera appliqué maintes fois, tant au niveau des cycles de conduite qu'au niveau des périodes d'activités des véhicules de Téo Taxi. Voici une représentation de l'outil de calcul qui a été développé (voir Figure 3-17).

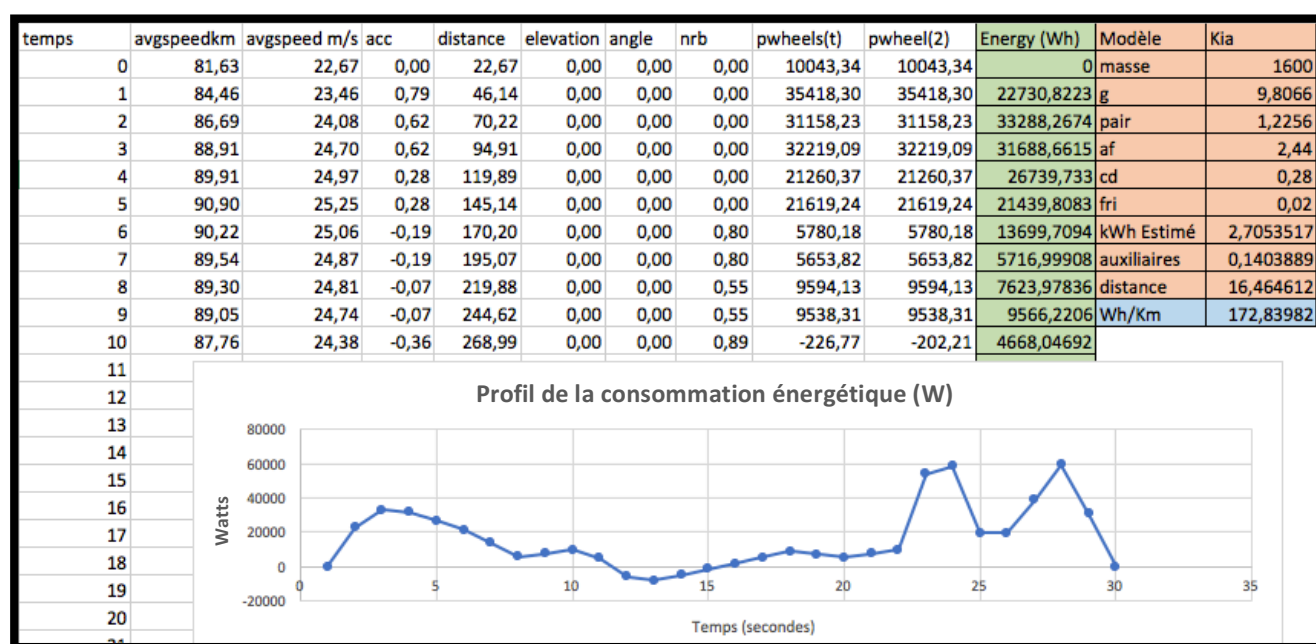


Figure 3-17 : Exemple de l'outil développé dans Excel pour le calcul de la consommation énergétique

La Figure 3-17 n'est qu'un exemple d'une petite partie de la feuille de calcul qui permet de calculer la consommation énergétique d'une course ainsi qu'une partie du profil de consommation. Le profil de consommation énergétique permet de visualiser l'énergie consommée (valeurs positives) par rapport à l'énergie produite (valeurs négatives). Les deux prochains graphiques (voir Figure 3-18

et Figure 3-19) permettent de bien comprendre la façon dont sont calculées les wattheures à partir des watts et la relation entre la consommation et la production d'énergie par rapport au profil de vitesse et d'accélération.

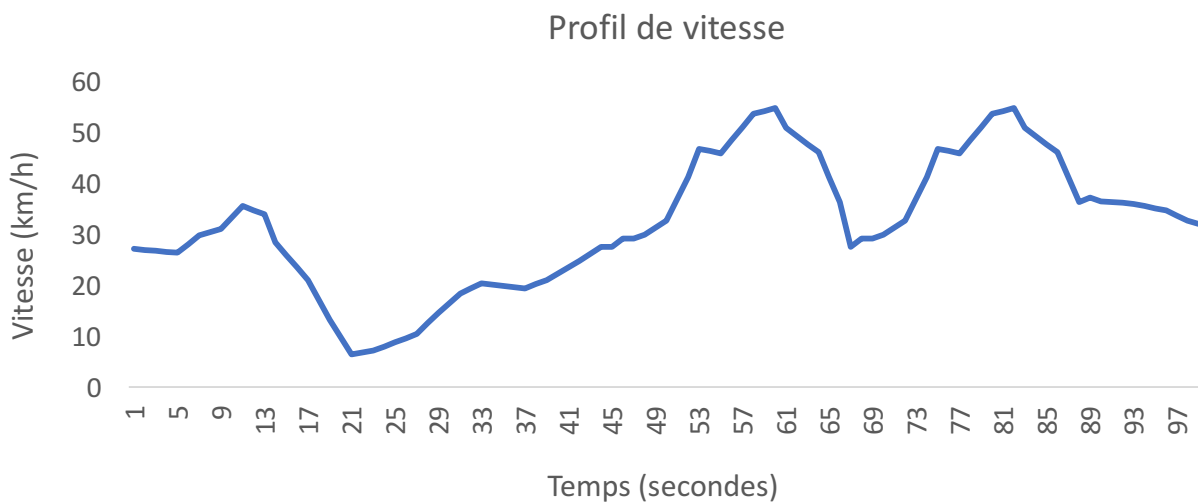


Figure 3-18 : Portion d'un profil de vitesse

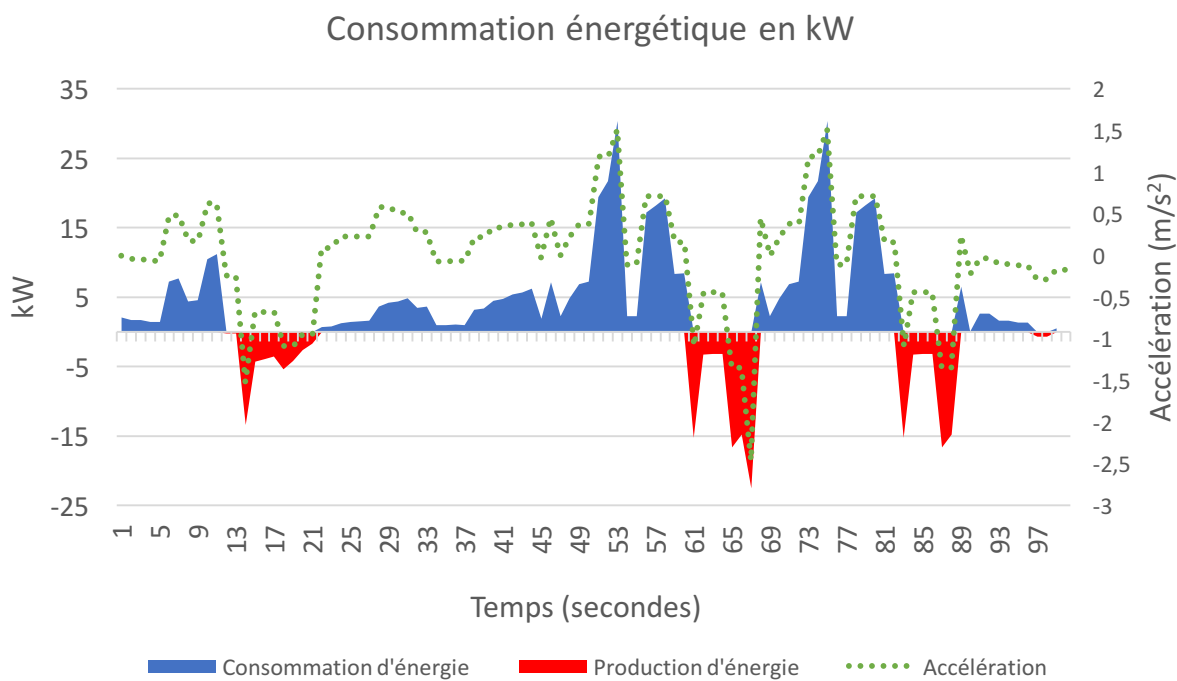


Figure 3-19 : Profil d'énergie relié au profil de vitesse présenté à la figure précédente

Il est possible de remarquer diverses similarités entre la courbe représentant le profil de vitesse de la Figure 3-18, la courbe représentant le profil d'accélération et la courbe d'énergie présentées à la Figure 3-19. Puisque l'accélération est directement reliée à la vitesse (équation 3-2), ce résultat était attendu. Or, l'accélération semble aussi être directement liée à l'énergie produite ou consommée, malgré les différents autres facteurs présents dans la formule du calcul de la puissance (équation 2-1). La somme de l'aire sous la courbe d'énergie (l'aire bleue moins l'aire rouge à la Figure 3-19) représente l'énergie totale consommée en wattheures. Il suffit ensuite de diviser cette énergie par la distance parcourue pour obtenir des Wh/km.

3.5 Validation de la consommation sur un secteur précis et sur un sous-ensemble de segments routiers

Pour terminer, il peut être intéressant de comparer les valeurs de consommation énergétique obtenues à partir des cycles de conduite développés avec des estimations provenant de différentes courses réelles. Ces comparaisons permettront de vérifier les cycles de conduite développés afin de tirer des conclusions au niveau des hypothèses émises à la section 3.2 qui n'ont pas encore été vérifiées. Un petit secteur a donc été sélectionné à partir de QGIS au sein duquel les valeurs de vitesses affichées ont été validées pour valider la consommation énergétique estimée sur rue résidentielle et artère principale. Pour la validation de la consommation énergétique estimée sur autoroute, un sous-ensemble de segments routiers a été sélectionné. Cette étape est nécessaire puisque les données de vitesses affichées présentes dans le fichier qui a servi à faire le *map matching* ne sont pas toujours valides.

3.5.1 Secteur à l'étude

Le secteur sélectionné pour valider les valeurs de consommation énergétique obtenues sur les rues résidentielles et les artères principales est constitué de rues résidentielles où la vitesse affichée est de 30 km/h et 40 km/h et d'artères principales où la vitesse affichée est de 50 km/h. Il y a aussi des petites ruelles où la vitesse affichée est de 5 km/h, mais aucun déplacement n'a été effectué sur ce type de segment routier. Voici une carte qui représente le secteur à l'étude (Figure 3-20).

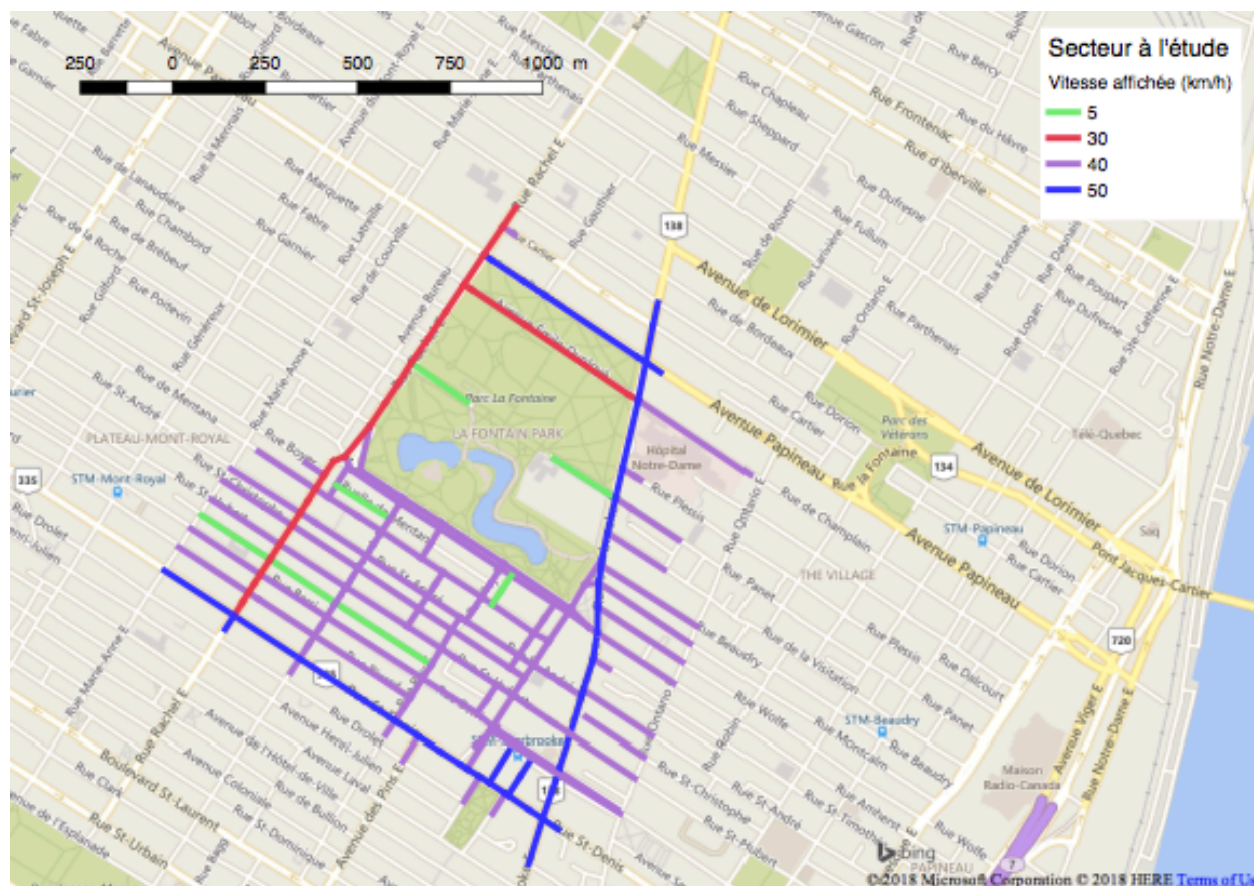


Figure 3-20 : Secteur à l'étude pour la validation des courses sur rues résidentielles et artères principales

Le secteur représenté à la Figure 3-20 (secteur du Parc Lafontaine) est composé de 227 segments. Il semble y en avoir beaucoup moins parce qu'un segment routier portant le même nom est habituellement décomposé en petites portions de segments (souvent à chaque fois qu'il y a une intersection). Toutes les informations nécessaires reliées aux segments routiers (nom du segment, localisation, vitesse affichée, etc.) ont donc été sauvegardées dans une nouvelle table dans PostgreSQL et ce dernier sera utile lors de la sélection des courses qui ont été effectuées sur ces segments.

Afin de valider la consommation énergétique obtenue à partir des cycles de conduite développés, un échantillon de courses a été sélectionné. Ces courses ont toutes été effectuées au sein du secteur présenté à la Figure 3-20 ou dans les environs. À titre d'exemple, voici 16 courses dont l'heure de départ se situe entre midi et 13h00 et qui ont été effectuées dans le secteur à l'étude le mercredi 31 août 2016 (voir Figure 3-21).

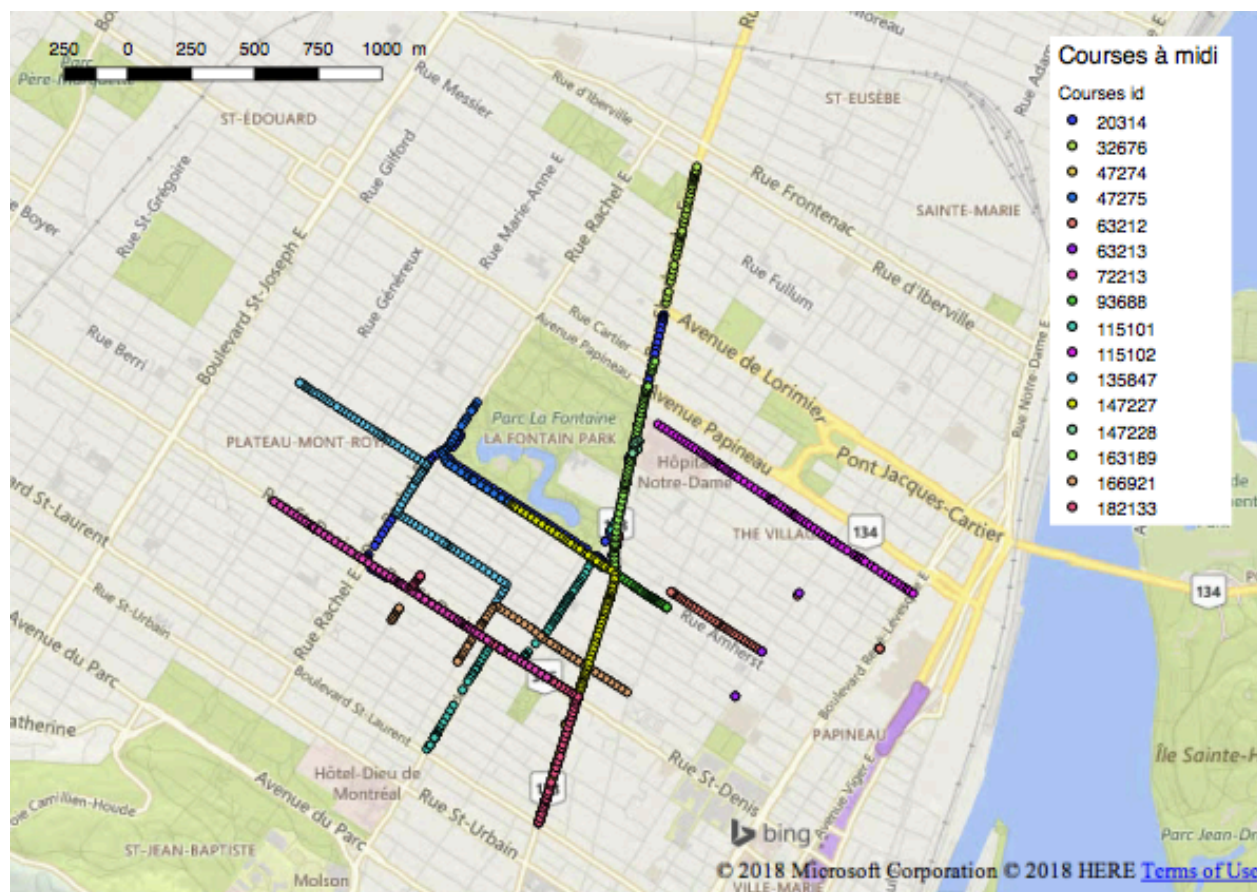


Figure 3-21 : Courses effectuées dans le secteur à l'étude le mercredi 31 août 2016 entre midi et 13h00

Les estimations de la consommation énergétique de ces portions de courses seront présentées au chapitre suivant.

3.5.2 Sous-ensemble de segments routiers

Une étude similaire a été réalisée, mais pour valider cette fois-ci la consommation énergétique des cycles de conduite développés sur autoroute. Un échantillon de courses GPS ayant été répertoriées sur un segment routier commençant par « autoroute » a donc été sélectionné et permettra, ainsi, de valider les valeurs de consommation énergétique des cycles de conduite. Voici une carte qui représente le sous-ensemble de segments d'autoroutes sélectionné (voir Figure 3-22).

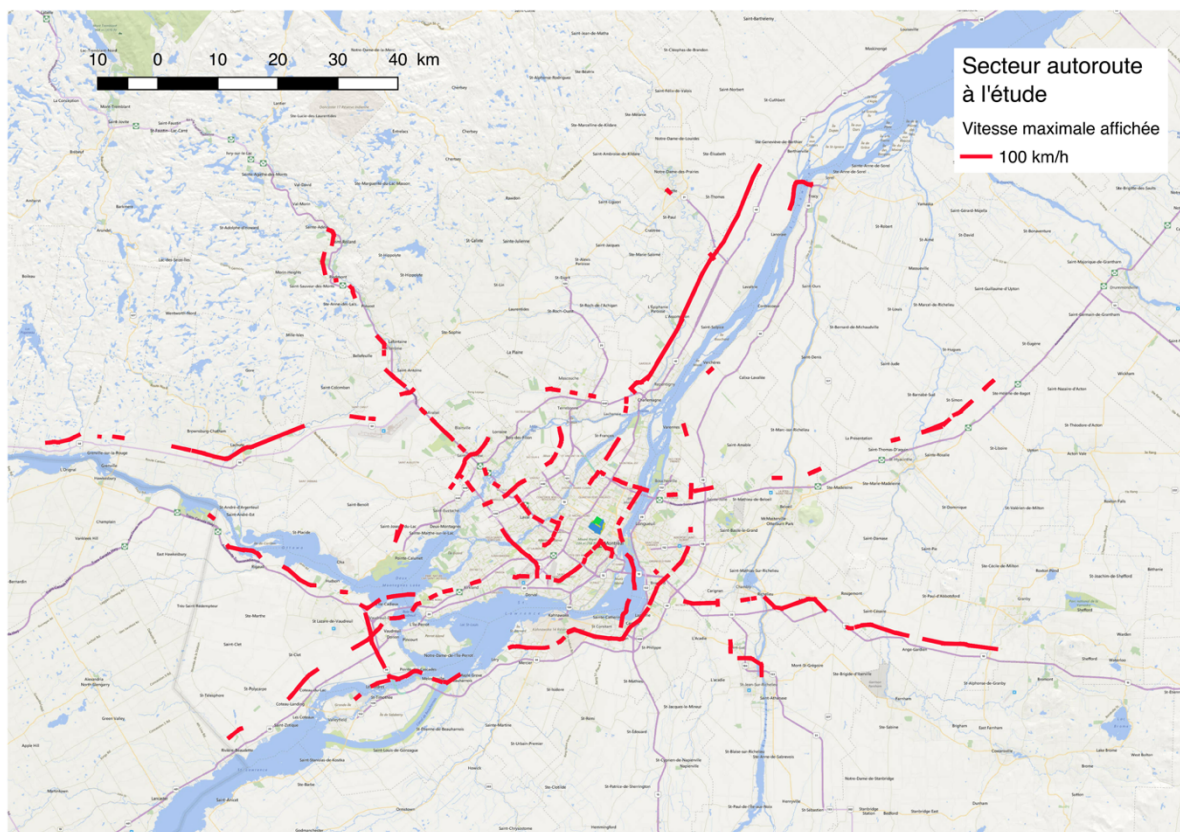


Figure 3-22 : Sous-ensemble de segments à l'étude pour la validation des portions de courses sur autoroute

Certaines portions d'autoroute ont une vitesse affichée maximale inférieure à 100 km/h (par exemple, sur une partie de l'autoroute 720 et sur l'autoroute métropolitaine, la vitesse affichée est de 70 km/h), mais lors de la sélection du secteur à l'étude, ces portions d'autoroute n'ont pas été sélectionnées; c'est la raison pour laquelle certaines autoroutes semblent segmentées. Le sous-ensemble de segments d'autoroute à l'étude permettant de valider la consommation énergétique estimée à partir des cycles de conduite pour les autoroutes est donc composé de 1 877 segments, ou portions d'autoroutes, qui ont une vitesse affichée maximale de 100 km/h dans la grande région de Montréal.

3.5.3 Traitement de données automatisé pour la sélection des courses

La sélection des courses pour cette partie de la recherche s'est effectuée à l'aide d'une procédure automatisée développée à la fois dans PostgreSQL et dans R. Dans le système de base de données, la sélection des courses s'est effectuée en suivant une démarche similaire à celle présentée à la

section 3.2.2.3 pour classer les segments routiers lors du développement des cycles de conduite. Toutes les courses ayant au moins un enregistrement GPS sur l'un des segments présents dans le secteur à l'étude ou dans le sous-ensemble de segments d'autoroute ont été sélectionnées à l'aide du *map matching* dans PostgreSQL. Ensuite, toutes les courses sélectionnées, qui étaient composées de moins de quatre micro-segments consécutifs (soit moins d'un kilomètre) possédant des enregistrements GPS dans les secteurs à l'étude, ont été supprimées. Les courses ont été séparées en fonction de leur positionnement géographique pour obtenir deux bases de données : l'une pour les courses effectuées dans le secteur du Parc Lafontaine et l'autre pour les courses effectuées au sein du sous-ensemble de segments d'autoroute. Une fois ces deux bases de données obtenues, elles ont été segmentées en fonction de la journée de l'enregistrement pour obtenir 14 bases de données au final. Dans le cas présent, les sept jours de la semaine seront étudiés afin de valider l'hypothèse portant sur la représentativité de certains de jours de la semaine.

Ensuite, les 14 tables ont été téléchargées dans R. Pour le secteur du Parc Lafontaine, une segmentation supplémentaire de la base de données a été effectuée pour garder seulement les courses qui ont été réalisées uniquement sur une rue résidentielle ou seulement sur une artère principale et non une combinaison des deux. Voici le nombre de courses final par type de segment routier et par jour (voir Tableau 3-12) :

Tableau 3-12 : Courses retenues qui ont été effectuées dans les secteurs à l'étude

Jour	Nombre de courses retenues par jour et par type de segment routier		
	Rues résidentielles	Artères principales	Autoroutes
Lundi	320	242	416
Mardi	408	276	498
Mercredi	442	264	610
Jeudi	503	338	672
Vendredi	541	410	671
Samedi	459	436	524
Dimanche	300	288	305

Au total, 2 973 courses ont donc été retenues pour la validation de la consommation énergétique des cycles de conduite développés sur les rues résidentielles, 2 254 courses sur les artères principales et 3 696 courses sur les autoroutes. Il est important de mentionner que l'élévation n'est pas prise en compte lors de l'estimation de la consommation énergétique de ces portions de courses puisqu'elle sera comparée avec la consommation énergétique estimée issue des cycles de conduite.

3.5.4 Traitement de données automatisé dans R pour estimer la consommation énergétique

Pour terminer, la procédure automatisée pour l'estimation de la consommation énergétique des véhicules électriques développée sur Excel et présentée à la section 3.4 a aussi été développée dans le logiciel R. Les valeurs choisies pour les paramètres présents dans l'équation du calcul de la consommation énergétique sont les mêmes que celles utilisées pour l'estimation de la consommation énergétique des cycles de conduite, sauf pour la vitesse en fonction du temps évidemment. Cette nouvelle procédure a permis de traiter un nombre beaucoup plus élevé de déplacements en beaucoup moins de temps comparativement à celle sur Excel. De plus, puisque les bases de données étaient déjà présentes dans R, l'estimation de la consommation énergétique pour chaque course est devenue beaucoup plus simple. Si la consommation énergétique des portions de courses avait été calculée sur Excel, il aurait fallu exporter les données de vitesse à partir de PostgreSQL et les copier dans le tableur. Or, l'accès aux tables présentes dans PostgreSQL à partir de R permet d'éliminer l'étape d'exportation. De plus, le processus itératif développé dans R permet d'estimer la consommation énergétique propre à chaque déplacement, alors que sur Excel, il faut utiliser un filtre pour isoler chaque déplacement afin que la consommation énergétique soit estimée pour le déplacement en question et non pour tous les déplacements regroupés. Le temps approximatif de calcul dans R pour une centaine de déplacements est de moins de 30 secondes.

CHAPITRE 4 RÉSULTATS

Ce chapitre se concentre sur les résultats obtenus suite aux différentes étapes présentées au chapitre précédent. Tout d'abord, les cycles de conduite développés sont présentés et analysés. Ensuite, les résultats des calculs de la consommation énergétique sur ces derniers sont présentés ainsi qu'une analyse de la consommation en fonction de la segmentation établie. La troisième section de ce chapitre porte sur les résultats obtenus au niveau de la consommation énergétique estimée versus celle rapportée provenant des données de consommation. Finalement, la dernière section présente les résultats de la validation du calcul de consommation énergétique au sein du secteur à l'étude et du sous-ensemble de segments autoroutiers. Toutes les statistiques présentées dans ce chapitre sont validées avec l'ANOVA et le test de Student, avec un intervalle de confiance de 95%.

4.1 Les cycles de conduite développés

Les cycles de conduite ont beaucoup été discutés dans les sections précédentes à cause de leur importance dans le cadre du développement des modèles de consommation énergétique. À titre de rappel, ils permettent de représenter un comportement de conduite en fonction du temps. Dans le cadre de cette recherche, ils permettent en plus de représenter le comportement de conduite en fonction de différents facteurs préalablement discutés. La présentation de quelques cycles de conduite au départ permet de bien comprendre le concept et de visualiser les impacts qu'ont certains facteurs sur le comportement de conduite. Ensuite, l'analyse des différents cycles de conduite sera effectuée, suivie par l'application du modèle de consommation énergétique sur les cycles de conduite développés.

4.1.1 Illustration globale de différents comportements de conduite

Pour commencer, il est important de présenter quelques résultats obtenus suite au développement des cycles de conduite afin de bien illustrer tout ce qui a été discuté à la section 3.2. La Figure 4-1 représente le comportement de conduite sur une autoroute le mercredi à 5h00, alors que sur la Figure 4-2, c'est le comportement de conduite sur une autoroute le mercredi à 16h00 qui est représenté.

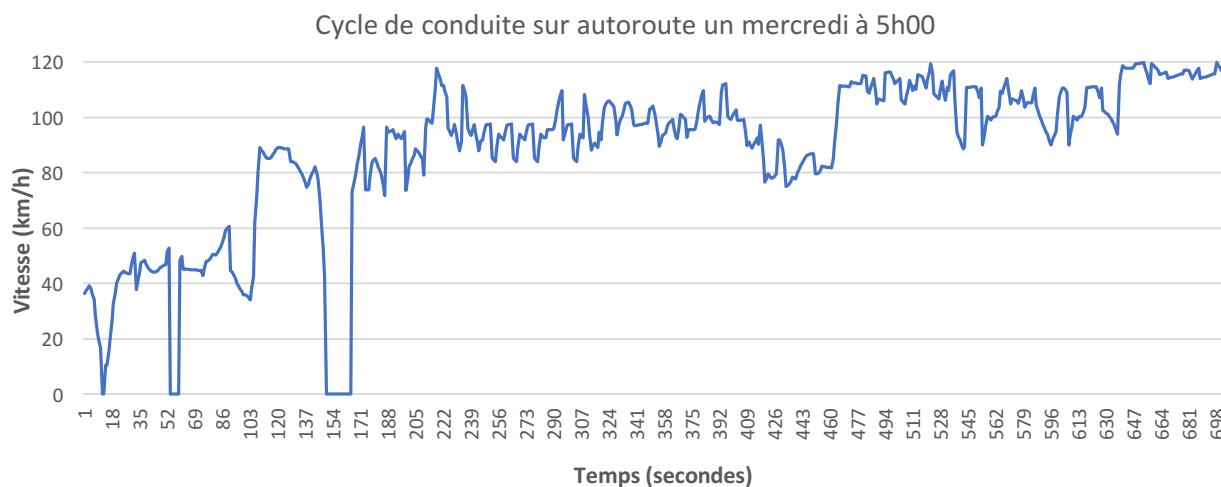


Figure 4-1 : Cycle de conduite sur autoroute un mercredi à 5h00

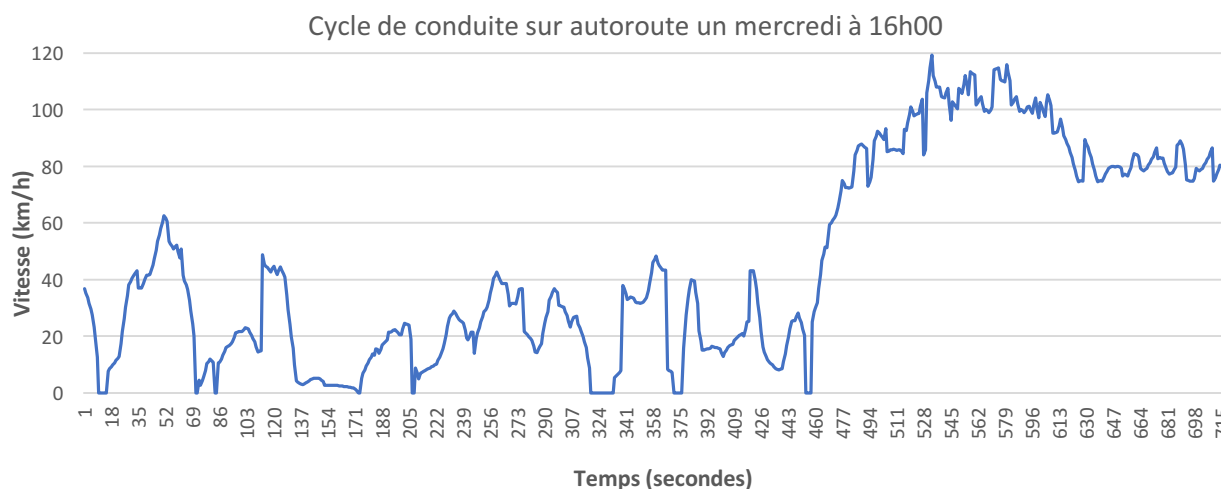


Figure 4-2 : Cycle de conduite sur autoroute un mercredi à 16h00

Les deux cycles de conduite illustrent bien les différences de vitesse en fonction du temps. Il est possible de remarquer qu'à 5h00, la vitesse moyenne semble beaucoup plus élevée qu'à 16h00. Ce résultat démontre qu'il y a une différence évidente au niveau de la densité de la circulation entre tôt le matin, soit avant l'heure de pointe, et pendant l'heure de pointe de l'après-midi. Il est intéressant aussi d'analyser les paramètres qui représentent les valeurs calculées des deux bases de données utilisées pour le développement de ces deux cycles de conduite (voir Tableau 4-1).

Tableau 4-1 : Paramètres calculés pour les cycles de conduite représentant le comportement de conduite sur autoroute un mercredi à 5h00 et à 16h00

Paramètres	5h00	16h00
Vitesse moyenne (km/h)	87,6	45,6
Vitesse moyenne sans compter les arrêts (km/h)	95,8	49,9
Vitesse maximale (km/h)	120,0	120,0
Accélération moyenne de toutes les phases d'accélération (m/s^2)	0,6	0,4
Décélération moyenne de toutes les phases de décélération (m/s^2)	-0,52	-0,49
Nombre moyen de changements accélération-décélération	125	217
Moyenne quadratique de l'accélération (m/s^2)	1,6	1,1
Puissance spécifique du véhicule (kW)	54,7	20,9
Proportion des temps d'arrêt (vitesse = 0 m/s)	8,5%	8,7%
Proportion des temps d'accélération (accélération $\geq 0,1 \text{ m/s}^2$)	33,8%	35,6%
Proportion des temps de croisière (vitesse $> 5 \text{ m/s}$ et $-0,1 \text{ m/s}^2 < \text{accélération} < 0,1 \text{ m/s}^2$)	33,2%	31,5%
Proportion des temps de décélération (décélération $\leq -0,1 \text{ m/s}^2$)	24,4%	13,8%
Proportion des temps de rampage (vitesse $< 5 \text{ m/s}$ et $-0,1 \text{ m/s}^2 < \text{accélération} < 0,1 \text{ m/s}^2$)	0,1%	10,4%

Simplement en comparant le premier paramètre, soit la vitesse moyenne en km/h entre les deux bases de données, il est possible d'affirmer qu'il y a effectivement une grande différence entre les comportements de conduite à 5h00 et à 16h00. La vitesse moyenne le matin est presque égale au double de la vitesse en après-midi. Il est aussi possible de remarquer une grande différence au niveau du nombre moyen de changements accélération-décélération ainsi qu'au niveau de la proportion des temps de décélération et de rampage. La différence presque nulle de la proportion des temps d'arrêts entre les deux cycles de conduite, qui semble être contre intuitive, est possiblement explicable par la grande différence de la proportion des temps de rampage : les conducteurs ont peut-être plus tendance à garder une vitesse plus faible et plus constante lorsque la densité de circulation est plus élevée. À l'aide de la représentation graphique des deux matrices SAFD obtenues reliées aux cycles de conduite de 5h00 et de 16h00 sur l'autoroute, il est possible de mieux discerner ces différences (Figure 4-3 et Figure 4-4).

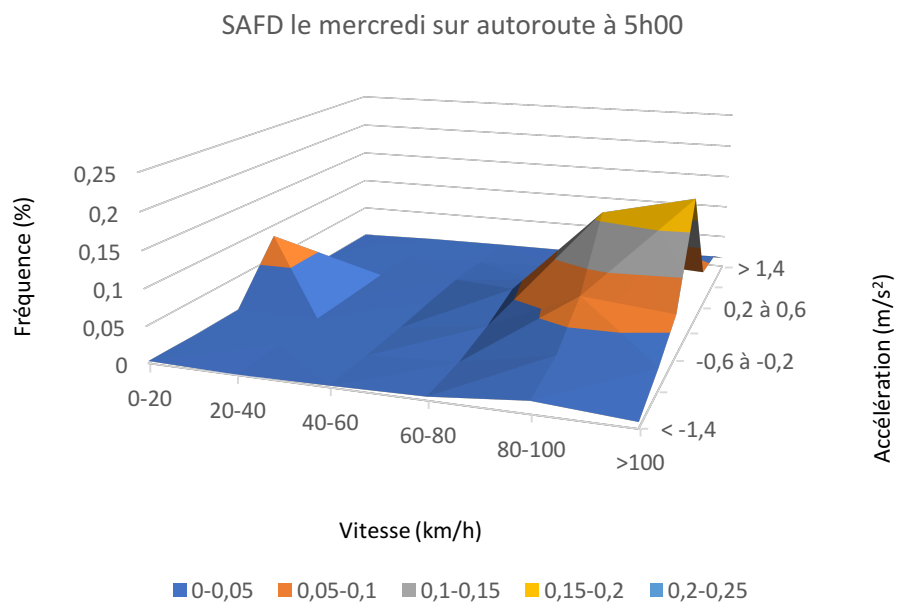


Figure 4-3 : SAFD le mercredi sur autoroute à 5h00

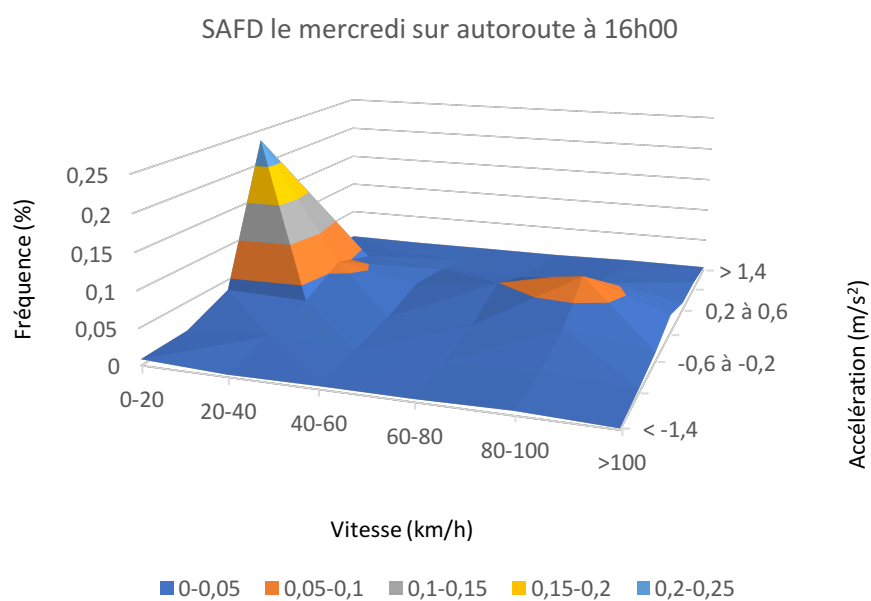


Figure 4-4 : SAFD le mercredi sur autoroute à 16h00

La différence de la distribution des fréquences de couples vitesses-accélérations est flagrante. Les vitesses sont beaucoup plus élevées et les accélérations plus distribuées à 5h00 qu'à 16h00.

Voici un autre exemple d'analyse intéressante qui peut être effectuée avec le développement de plusieurs cycles de conduite; la comparaison des cycles obtenus entre les différents types de segments routiers. La Figure 4-5, la Figure 4-6 et la Figure 4-7 représentent les comportements de conduite le dimanche matin à 9h00 sur une rue résidentielle, sur une artère principale et sur une autoroute respectivement.

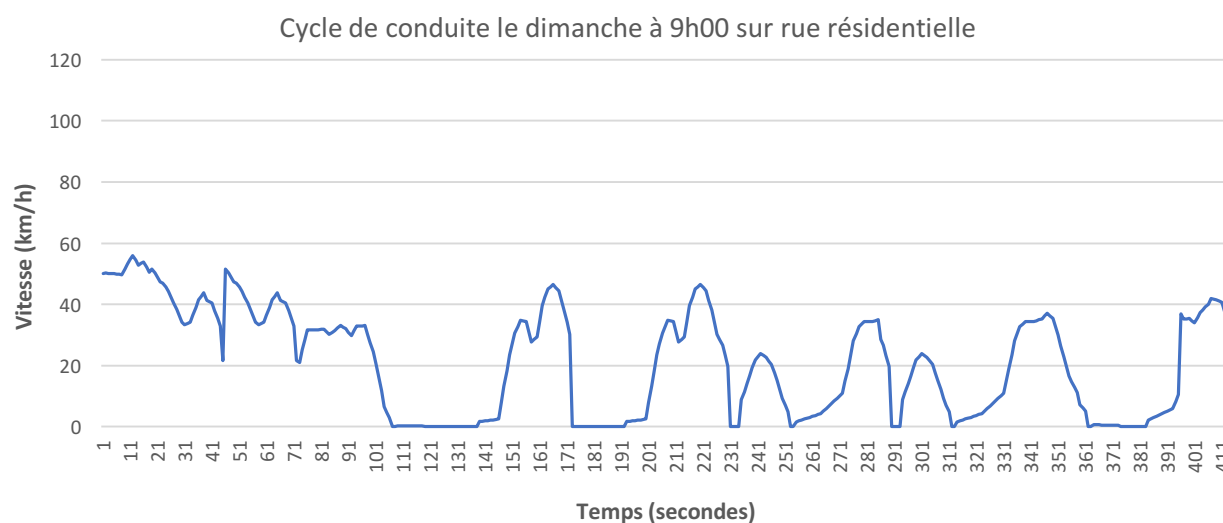


Figure 4-5 : Cycle de conduite le dimanche à 9h00 sur rue résidentielle

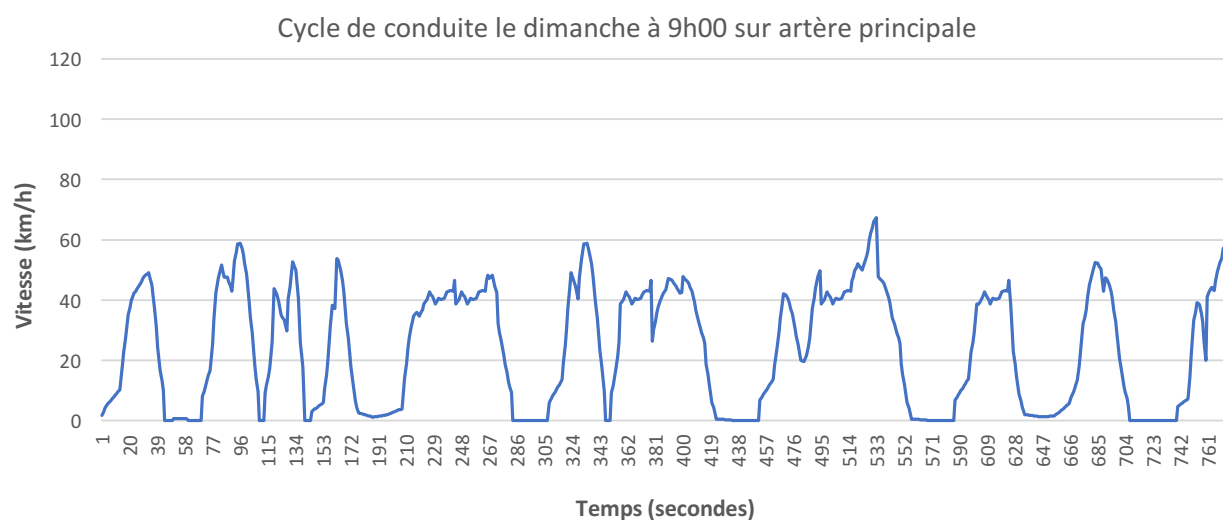


Figure 4-6 : Cycle de conduite le dimanche à 9h00 sur artère principale

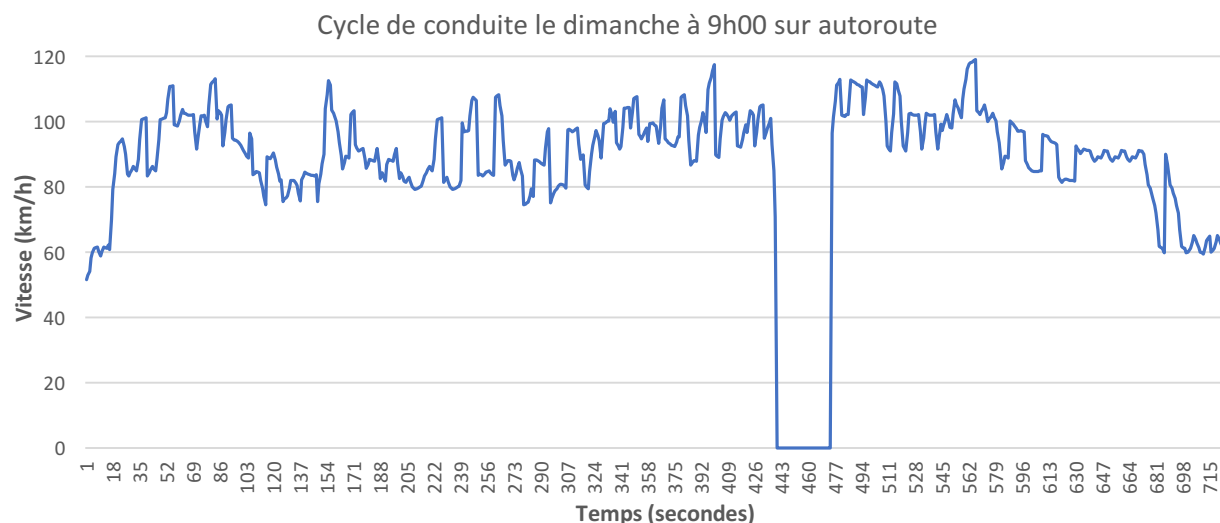


Figure 4-7 : Cycle de conduite le dimanche à 9h00 sur autoroute

Il est important de mentionner que l'échelle de temps est un peu différente pour le cycle de conduite sur rue résidentielle puisque le temps de parcours moyen sur ce type de segment routier était moins élevé que celui des deux autres; il était donc impossible de développer des cycles de conduite plus longs. Il est possible de constater qu'il y a de fortes différences entre les trois types de segments routiers, particulièrement au niveau de la rue résidentielle et de l'artère principale par rapport à l'autoroute. Ces résultats auront une grande répercussion sur la consommation énergétique des véhicules électriques et cela sera discuté plus loin dans le document, soit à la section 4.2. Le Tableau 4-2 présente de façon détaillée les paramètres calculés issus des trois bases de données utilisées pour le développement de ces trois cycles de conduite.

Tableau 4-2 : Paramètres calculés pour les cycles de conduite développés le dimanche à 9h00 sur les trois types de segments routiers

Paramètres	Rue résidentielle	Artère principale	Autoroute
Vitesse moyenne (km/h)	21,8	23,7	86,9
Vitesse moyenne sans compter les arrêts (km/h)	26,0	28,1	90,9
Vitesse maximale (km/h)	58,0	83,8	119,9
Accélération moyenne de toutes les phases d'accélération (m/s^2)	0,5	0,5	0,5
Décélération moyenne de toutes les phases de décélération (m/s^2)	-0,6	-0,6	-0,4
Nombre moyen de changements accélération-décélération	30	33	111
Moyenne quadratique de l'accélération (m/s^2)	0,7	0,7	1,1
Puissance spécifique du véhicule (kW)	5,5	6,5	51,3
Proportion des temps d'arrêt (vitesse = 0 m/s)	16%	16%	5%
Proportion des temps d'accélération (accélération $\geq 0,1 \text{ m/s}^2$)	31%	37%	34%
Proportion des temps de croisière (vitesse $> 5 \text{ m/s}$ et $-0,1 \text{ m/s}^2 < \text{accélération} < 0,1 \text{ m/s}^2$)	9%	8%	27%
Proportion des temps de décélération (décélération $\leq -0,1 \text{ m/s}^2$)	30%	29%	34%
Proportion des temps de rampe (vitesse $< 5 \text{ m/s}$ et $-0,1 \text{ m/s}^2 < \text{accélération} < 0,1 \text{ m/s}^2$)	14%	11%	0,3%

4.1.1.1 Segmentation en fonction du type de route

Au départ, la segmentation des données s'est effectuée en fonction des types de segment routier suivants : rue résidentielle, artère principale et autoroute. Le Tableau 4-3 présente les paramètres moyens calculés en fonction de ces trois types de segment routier, toutes journées et toutes heures confondues. Ces valeurs représentent la moyenne des 68 cycles de conduite développés par type de segment routier.

Tableau 4-3 : Moyenne des paramètres calculés issus de tous les cycles de conduite développés en fonction du type de segment routier

Paramètres	Rue résidentielle	Artère principale	Autoroute
Vitesse moyenne (km/h)	20,9	21,1	70,2
Vitesse moyenne sans compter les arrêts (km/h)	26,0	26,0	75,1
Accélération moyenne de toutes les phases d'accélération (m/s^2)	0,5	0,5	0,5
Décélération moyenne de toutes les phases de décélération (m/s^2)	-0,6	-0,6	-0,5
Nombre moyen de changements accélération-décélération	39	46	154
Moyenne quadratique de l'accélération (m/s^2)	0,7	0,6	1,3
Puissance spécifique du véhicule (kW)	5,2	5,9	38,7
Proportion des temps d'arrêt (vitesse = 0 m/s)	20%	18%	7%
Proportion des temps d'accélération (accélération $\geq 0,1 \text{ m/s}^2$)	34%	34%	36%
Proportion des temps de croisière (vitesse $> 5 \text{ m/s}$ et $-0,1 \text{ m/s}^2 < \text{accélération} < 0,1 \text{ m/s}^2$)	8%	8%	20%
Proportion des temps de décélération (décélération $\leq -0,1 \text{ m/s}^2$)	29%	29%	34%
Proportion des temps de rampe (vitesse $< 5 \text{ m/s}$ et $-0,1 \text{ m/s}^2 < \text{accélération} < 0,1 \text{ m/s}^2$)	10%	11%	3%

Il y a peu de différence entre les comportements de conduite sur rue résidentielle et sur artère principale; la moyenne de leurs paramètres respectifs est très semblable. L'accélération, qu'elle soit positive ou négative, a une grande influence sur la consommation énergétique. Puisqu'il y a peu de différence entre le nombre moyen de changements accélération-décélération et très peu aussi au niveau de la vitesse moyenne, il est probable que la différence de consommation énergétique entre les deux segments routiers soit faible. Or, sur autoroute, les comportements de conduite sont différents de ceux sur rue résidentielle et sur artère principale à tous les niveaux. En appliquant le test de Student, les différences entre rue résidentielle et artère principale ne sont pas statistiquement significatives et cela est vrai pour tous les paramètres (la valeur-p est largement supérieure à 0,05 dans un intervalle de confiance de 95%). Par contre, les différences sont toutes statistiquement significatives entre rue résidentielle et autoroute, ainsi qu'entre artère principale et autoroute. En occurrence, la segmentation en fonction du type de segment routier semble plus pertinente lorsque la différence de la vitesse maximale affichée est plus élevée.

4.1.1.2 Segmentation en combinant le type de segment routier et le jour de la semaine

Suite à la segmentation routière qui a été effectuée, la segmentation journalière a engendré les résultats présentés au Tableau 4-4, au Tableau 4-5 et au Tableau 4-6.

Tableau 4-4 : Moyenne et écart-type des paramètres calculés issus de tous les cycles de conduite développés sur rue résidentielle en fonction du type de jour

Paramètres	Rue résidentielle							
	Lundi		Mercredi		Vendredi		Dimanche	
	Moy.	Écart-type	Moy.	Écart-type	Moy.	Écart-type	Moy.	Écart-type
Vitesse moyenne (km/h)	21,1	2,5	19,6	2,4	20,8	2,4	22,2	3,1
Vitesse moyenne sans compter les arrêts (km/h)	25,7	2,8	25,1	2,1	25,8	2,6	27,3	3,0
Accélération moyenne (m/s^2)	0,5	0,0497	0,5	0,0490	0,5	0,0378	0,5	0,0399
Décélération moyenne (m/s^2)	-0,5	0,0376	-0,6	0,0319	-0,6	0,0434	-0,6	0,0510
Nombre moyen changements accélération-décélération	36	8,5	41	7,0	41	5,0	40	9,4
Moyenne quadratique de l'accélération (m/s^2)	0,6	0,1	0,7	0,2	0,7	0,1	0,7	0,1
Puissance spécifique du véhicule (kW)	5,2	0,9	4,8	0,8	5,1	0,7	5,6	0,9
% des temps d'arrêt	18%	2,45%	22%	6,25%	19%	2,54%	19%	5,87%
% des temps d'accélération	34%	1,66%	33%	2,91%	34%	1,40%	34%	2,90%
% des temps de croisière	8%	1,14%	7%	0,99%	8%	0,96%	9%	1,76%
% des temps de décélération	29%	1,80%	28%	2,72%	29%	2,19%	29%	2,88%
% des temps de rampe	10%	2,80%	10%	2,45%	9%	2,24%	9%	2,39%

Tableau 4-5 : Moyenne et écart-type des paramètres calculés issus de tous les cycles de conduite développés sur artère principale en fonction du type de jour

Paramètres	Artère principale							
	Lundi		Mercredi		Vendredi		Dimanche	
	Moy.	Écart-type	Moy.	Écart-type	Moy.	Écart-type	Moy.	Écart-type
Vitesse moyenne (km/h)	20,9	3,4	20,2	4,1	20,5	3,2	22,7	3,7
Vitesse moyenne sans compter les arrêts (km/h)	25,8	3,5	25,1	4,3	25,5	3,4	27,4	3,7
Accélération moyenne (m/s^2)	0,5	0,0471	0,5	0,0535	0,5	0,0367	0,5	0,0411
Décélération moyenne (m/s^2)	-0,5	0,0332	-0,5	0,0441	-0,5	0,0405	-0,6	0,0379
Nombre moyen changements accélération-décélération	40	4,8	42	5,6	41	4,4	39	5,6
Moyenne quadratique de l'accélération (m/s^2)	0,6	0,1	0,6	0,1	0,6	0,1	0,6	0,1
Puissance spécifique du véhicule (kW)	5,4	1,2	5,3	1,5	5,3	1,1	6,0	1,3
% des temps d'arrêt	19%	2,46%	20%	2,81%	20%	2,12%	18%	2,53%
% des temps d'accélération	33%	1,70%	33%	2,04%	33%	1,79%	35%	1,82%
% des temps de croisière	7%	1,11%	7%	1,40%	7%	1,16%	8%	1,49%
% des temps de décélération	28%	2,47%	27%	2,69%	27%	2,32%	29%	2,13%
% des temps de rampage	12%	2,91%	13%	3,82%	13%	3,40%	11%	3,29%

Tableau 4-6 : Moyenne et écart-type des paramètres calculés issus de tous les cycles de conduite développés sur autoroute en fonction du type de jour

Paramètres	Autoroute							
	Lundi		Mercredi		Vendredi		Dimanche	
	Moy.	Écart-type	Moy.	Écart-type	Moy.	Écart-type	Moy.	Écart-type
Vitesse moyenne (km/h)	68,7	10,7	66,2	13,0	66,2	11,5	79,5	6,6
Vitesse moyenne sans compter les arrêts (km/h)	73,7	11,2	71,1	14,1	70,7	12,4	84,9	5,9
Accélération moyenne (m/s^2)	0,5	0,0431	0,5	0,0490	0,5	0,0420	0,5	0,0333
Décélération moyenne (m/s^2)	-0,5	0,0373	-0,5	0,0345	-0,5	0,0400	-0,5	0,0482
Nombre moyen changements accélération-décélération	152	32,8	162	33,8	168	27,3	134	21,9
Moyenne quadratique de l'accélération (m/s^2)	1,3	0,3	1,2	0,3	1,3	0,3	1,4	0,3
Puissance spécifique du véhicule (kW)	37,3	8,6	35,7	10,2	35,6	8,8	46	5,1
% des temps d'arrêt	7%	1,48%	7%	1,16%	6%	1,21%	6%	1,56%
% des temps d'accélération	37%	1,11%	37%	1,10%	37%	1,34%	35%	1,47%
% des temps de croisière	20%	2,91%	19%	2,98%	19%	3,23%	23%	3,58%
% des temps de décélération	34%	0,91%	34%	1,34%	34%	0,86%	34%	0,90%
% des temps de rampage	3%	2,34%	4%	3,07%	4%	2,49%	1%	1,22%

Les différences de vitesses moyennes et de celles sans compter les arrêts entre le lundi, le mercredi et le vendredi sont très faibles. En semaine, la valeur de la vitesse moyenne est tout de même toujours un peu plus élevée le lundi. Le dimanche, la vitesse moyenne et celle sans compter les arrêts sont toujours les valeurs les plus élevées. Sur rue résidentielle et sur artère principale, le nombre moyen de changements accélération-décélération est très stable pour les quatre jours, alors que ce paramètre est plus élevé le mercredi et le vendredi que le lundi et le dimanche sur autoroute.

Sur rue résidentielle, les différences entre les paramètres sont statistiquement significatives seulement au niveau de la vitesse moyenne sans compter les arrêts et au niveau de la proportion des temps de croisière entre le mercredi et le dimanche (valeur-p = 0,0219 et valeur-p = 0,0302 respectivement). Sur artère principale, les différences sont statistiquement significatives seulement pour la proportion des temps d'arrêts et pour la proportion des temps d'accélération entre le lundi et le dimanche, le mercredi et le dimanche ainsi qu'entre le vendredi et le dimanche. Cela signifie que les comportements de conduite au niveau des temps d'arrêts et des accélérations sont différents pour les jours de semaine par rapport à la fin de semaine (qui équivaut au dimanche dans le cas présent).

Finalement, sur autoroute, la moitié des paramètres démontrent des différences significatives entre les jours de semaine et le dimanche. Cela démontre encore une fois qu'il y a des différences au niveau du comportements de conduite entre ces journées. Les valeurs-p obtenues suite à l'application du test de Student sont présentées au Tableau 4-7. Les paramètres qui ne sont pas présents dans ce tableau sont les paramètres qui ne présentaient pas de différence significative.

Tableau 4-7 : Valeurs-p pour évaluer la différences entre différents paramètres sur autoroute

Paramètres	Valeur-p		
	Lundi-Dimanche	Mercredi-Dimanche	Vendredi-Dimanche
Vitesse moyenne	0,0015	0,0010	0,0003
Vitesse moyenne sans compter les arrêts	0,0013	0,0012	0,0003
Nombre moyen changements accélération-décélération	0,0640	0,0079	0,0004
Puissance spécifique du véhicule	0,0014	0,0011	0,0003
Proportion des temps d'accélération	0,0210	0,0308	0,0094
Proportion des temps de croisière	0,0117	0,0026	0,0033
Proportion des temps de rampe	0,0159	0,0025	0,0004

4.1.1.3 Segmentation en combinant le type de segment routier, le jour du déplacement et de l'heure de départ

Le Tableau 4-8, le Tableau 4-9 et le Tableau 4-10 présentent les résultats obtenus lorsque la segmentation s'effectue au niveau de l'heure de départ de la course. Les valeurs présentent les résultats obtenus pour chaque heure en prenant en compte la segmentation en fonction du type de segment routier et du jour de la semaine. Seules les valeurs de la vitesse sans compter les arrêts et du nombre moyen accélération-décélération sont présentées. L'intérêt principal du développement de cycles de conduite est d'alimenter les modèles de consommation énergétique et seules les valeurs de vitesses et d'accélérations sont incluses dans l'équation 2-1 qui permet d'estimer la consommation énergétique des véhicules électriques. Quoiqu'il en soit, les autres paramètres sont très semblables d'une heure de départ à l'autre et d'un jour à l'autre. Il est possible de retrouver les autres paramètres calculés à l'ANNEXE B.

Tableau 4-8 : Vitesse moyenne et nombre moyen d'accélération-décélération issus des cycles de conduite développés sur rue résidentielle en fonction du type de jour et de l'heure

	Rue résidentielle							
	Lundi		Mercredi		Vendredi		Dimanche	
Heure de départ	Vitesse (km/h)	Nombre acc.-déc.	Vitesse (km/h)	Nombre acc.-déc.	Vitesse (km/h)	Nombre acc.-déc.	Vitesse (km/h)	Nombre acc.-déc.
5h00	33,5	21	25,1	36	32,7	42	29,8	33
6h00	26,7	23	15,2	19	30,4	33	35,8	29
7h00	25,6	38	23,0	34	26,8	36	32,2	53
8h00	20,3	40	18,3	37	26,2	39	26,8	30
9h00	23,7	50	19,9	43	25,2	39	26,0	30
10h00	24,3	44	17,6	43	25,5	39	27,3	46
11h00	25,7	29	22,0	38	26,1	40	25,7	38
12h00	26,8	37	21,2	46	23,6	48	27,1	47
13h00	25,2	40	20,9	39	25,2	38	26,9	37
14h00	24,5	40	17,9	43	25,7	36	24,9	51
15h00	23,2	44	18,8	43	22,0	47	23,3	60
16h00	25,4	37	18,0	49	24,8	42	25,6	39
17h00	23,0	46	17,6	45	23,5	54	26,6	42
18h00	27,8	32	18,7	42	24,9	39	26,0	37
19h00	25,8	33	18,8	35	25,2	42	28,5	30
20h00	27,3	37	18,8	34	23,4	42	24,9	36
Minuit	28,3	22	21,5	31	26,9	42	26,8	51

Il est possible de remarquer des différences entre la vitesse et le nombre moyen de changements accélération-décélération en fonction de l'heure de départ de la course sur rue résidentielle. Les valeurs de vitesses ont tendance à diminuer vers l'heure de pointe du matin ainsi que vers l'heure de pointe de l'après-midi du lundi au vendredi alors que le dimanche, les vitesses sont assez stables. Toutes les vitesses maximales se retrouvent très tôt le matin, soit entre 5h00 et 6h59 et elles sont toujours très élevées aussi la nuit (minuit) par rapport aux autres heures de départ. Le nombre moyen de changements accélérations-décélération varie énormément en fonction de l'heure mais les valeurs ont tendance à être beaucoup élevées en après-midi.

Tableau 4-9 : Vitesse moyenne et nombre moyen d'accélération-décélération issus des cycles de conduite développés sur artère principale en fonction du type de jour et de l'heure

	Artère principale							
	Lundi		Mercredi		Vendredi		Dimanche	
Heure de départ	Vitesse (km/h)	Nombre acc.-déc.	Vitesse (km/h)	Nombre acc.-déc.	Vitesse (km/h)	Nombre acc.-déc.	Vitesse (km/h)	Nombre acc.-déc.
5h00	32,3	39	34,6	25	33,3	44	37,0	42
6h00	29,1	35	33,7	44	31,6	31	31,7	40
7h00	25,4	39	26,9	41	26,2	43	29,9	35
8h00	21,3	48	21,4	44	24,1	48	30,7	36
9h00	23,4	43	23,1	44	24,2	41	28,1	31
10h00	23,6	44	23,9	43	24,7	44	28,3	33
11h00	25,7	38	24,7	40	25,2	39	27,4	33
12h00	25,6	41	21,0	41	24,8	43	22,2	43
13h00	23,5	36	23,5	44	24,1	38	25,0	39
14h00	23,8	43	23,7	45	23,0	42	23,5	36
15h00	22,1	41	22,2	48	22,2	41	23,7	54
16h00	21,9	52	20,9	48	21,1	49	24,8	44
17h00	24,0	40	20,7	50	22,7	42	24,3	47
18h00	26,4	39	23,3	43	24,2	40	26,7	38
19h00	28,8	34	24,3	42	24,7	42	27,4	39
20h00	28,8	36	28,1	39	26,2	40	29,2	37
Minuit	33,1	37	31,1	35	31,2	34	25,8	44

Les valeurs obtenues sur une artère principale varient de la même façon que celles sur une rue résidentielle. Il est intéressant par contre de remarquer que la vitesse sur une artère principale peut parfois être plus faible que sur une rue résidentielle, surtout l'après-midi. Cette constatation peut

probablement signifier que les heures de pointe semblent affecter davantage les comportements de conduite sur les segments routiers ayant une vitesse maximale plus élevée.

Tableau 4-10 : Vitesse moyenne et nombre moyen d'accélération-décélération issus des cycles de conduite développés sur autoroute en fonction du type de jour et de l'heure

Heure de départ	Autoroute							
	Lundi		Mercredi		Vendredi		Dimanche	
	Vitesse (km/h)	Nombre acc.-déc.	Vitesse (km/h)	Nombre acc.-déc.	Vitesse (km/h)	Nombre acc.-déc.	Vitesse (km/h)	Nombre acc.-déc.
5h00	87,0	118	95,8	125	93,9	124	94,2	122
6h00	79,6	146	84,6	140	85,7	123	92,3	123
7h00	76,3	174	77,6	143	77,9	150	91,2	95
8h00	59,5	179	53,1	194	63,4	170	89,1	96
9h00	65,6	176	75,4	143	72,0	166	90,9	111
10h00	77,6	128	75,2	115	73,1	151	87,6	124
11h00	83,7	144	80,4	129	79,9	160	84,7	116
12h00	82,3	128	78,5	144	69,3	164	77,2	148
13h00	82,0	143	77,2	174	66,4	181	86,8	143
14h00	69,2	149	62,1	178	57,3	177	89,6	131
15h00	56,4	196	49,1	198	48,3	218	80,2	149
16h00	59,0	200	49,9	217	54,0	214	76,2	168
17h00	54,2	191	48,9	228	58,9	198	75,2	164
18h00	74,9	162	62,0	188	62,8	192	81,0	150
19h00	88,1	146	80,0	157	73,5	165	81,5	151
20h00	85,2	137	77,5	149	85,0	155	84,9	132
Minuit	73,0	70	80,7	129	80,4	141	80,7	152

Les variations de la vitesse en fonction de l'heure de départ et du jour de la semaine sont beaucoup plus importantes sur les autoroutes que sur les rues résidentielles ou les artères principales. Par exemple, le mercredi, la vitesse moyenne à 5h00 est de 96 km/h, alors qu'elle est de 49 km/h à 15h00, soit près de la moitié de la vitesse moyenne sans compter les arrêts. Les vitesses le dimanche ne varient pas énormément, alors que les heures de pointe du matin et de l'après-midi sont bien représentées par la diminution des vitesses lors de ces périodes en semaine. Le nombre moyen de changements accélération-décélération est, dans tous les cas, plus élevé en après-midi et cela aura certainement une répercussion sur la consommation énergétique des véhicules électriques.

4.2 Consommation énergétique estimée pour les différents cycles de conduite

Cette section porte sur l'estimation de la consommation énergétique issue des différents cycles de conduite développés. Des tests statistiques permettront de valider si les hypothèses émises au niveau des différences potentielles de consommation énergétique sont valables.

4.2.1 Impacts du type de segment routier emprunté sur la consommation énergétique

Suite à la présentation des différents comportements de conduite en fonction des types de segments routiers, du jour de la semaine et de l'heure à laquelle ces derniers sont analysés, il est temps de démontrer la répercussion de ces différences sur la consommation énergétique des véhicules électriques en milieu urbain. La consommation énergétique a été estimée pour la totalité des cycles de conduite développés, soit pour 204 cycles de conduite. Pour commencer, la Figure 4-8 présente de façon globale la consommation énergétique moyenne en wattheure par kilomètre sur les trois types de segments routiers étudiés.

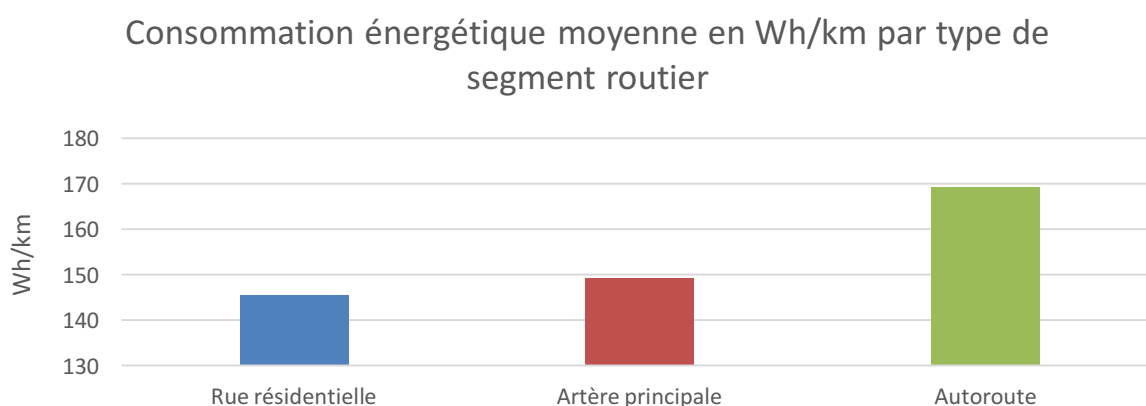


Figure 4-8 : Consommation énergétique moyenne en Wh/km par type de segment routier

Il est important de mentionner que les valeurs moyennes de consommation énergétique sont très faibles et cela est dû au fait que les paramètres fixes et variables utilisés dans l'équation 2-1 ne sont pas nécessairement exacts et la pente de la route est considérée comme étant égale à zéro pour tous les cycles de conduite. Or, cela a peu d'importance puisque tant que les paramètres sont équivalents pour tous les cycles de conduite construits, la comparaison entre eux devient possible. Il y a une très faible différence de consommation énergétique moyenne entre l'estimation sur rue résidentielle

et sur artère principale. Par contre, lorsque le test de Student est appliqué pour vérifier si la différence entre la moyenne de consommation énergétique sur rue résidentielle et sur artère principale est statistiquement significative, le résultat est concluant : la valeur-p obtenue est de $3,6 \times 10^{-5}$. La différence de consommation moyenne entre ces deux derniers types de segments routiers et le troisième, sur autoroute, est beaucoup plus élevée et la différence des moyennes est encore plus statistiquement significative : la valeur-p est de $2,2 \times 10^{-16}$ entre rue résidentielle et autoroute et de $2,4 \times 10^{-16}$ entre artère principale et autoroute. Ces résultats statistiques valident l'hypothèse émise quant à l'impact du type de segment routier emprunté sur la consommation énergétique des véhicules électriques, mais même si la différence entre les valeurs obtenues suite à la segmentation sur rues résidentielles et sur artères principales semble faible.

4.2.2 Impacts du jour de la semaine sur la consommation énergétique

La seconde hypothèse émise au niveau des différences de consommation énergétique porte sur la segmentation des données en fonction du jour de la semaine. Les consommations énergétiques moyennes ont donc été calculées le lundi, le mercredi, le vendredi et le dimanche, tous les types de segments routiers confondus. La Figure 4-9 illustre les résultats obtenus.

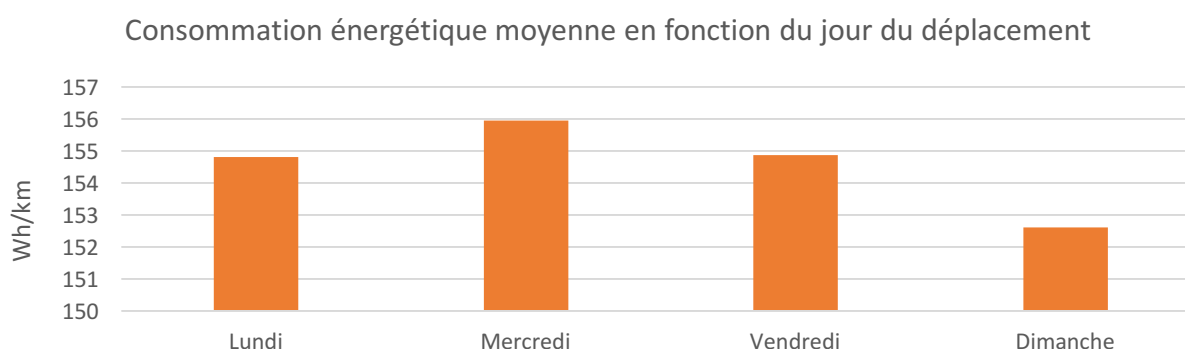


Figure 4-9 : Consommation énergétique moyenne en fonction du type de jour

À première vue, les différences semblent considérables, mais il est important de porter attention à l'échelle de l'axe vertical : la plus grande différence de consommation se retrouve entre le mercredi et le dimanche, mais cette différence équivaut à peine plus de 3 Wh/km. Les résultats obtenus suite au test de Student démontrent que la différence n'est statistiquement pas significative entre toutes les combinaisons possibles des moyennes pour les quatre jours à l'étude (les valeurs-p obtenues sont toujours largement supérieures à 0,05).

4.2.3 Impacts de l'heure de départ du déplacement sur la consommation énergétique

La dernière segmentation qui permet d'analyser la consommation énergétique des véhicules électriques s'est effectuée au niveau de l'heure de départ de la course. Le calcul de la consommation énergétique de tous les cycles de conduite combinés, donc tous les types de segments routiers et tous les jours confondus, mais segmentés en fonction de l'heure de départ, engendre les résultats présentés à la Figure 4-10.

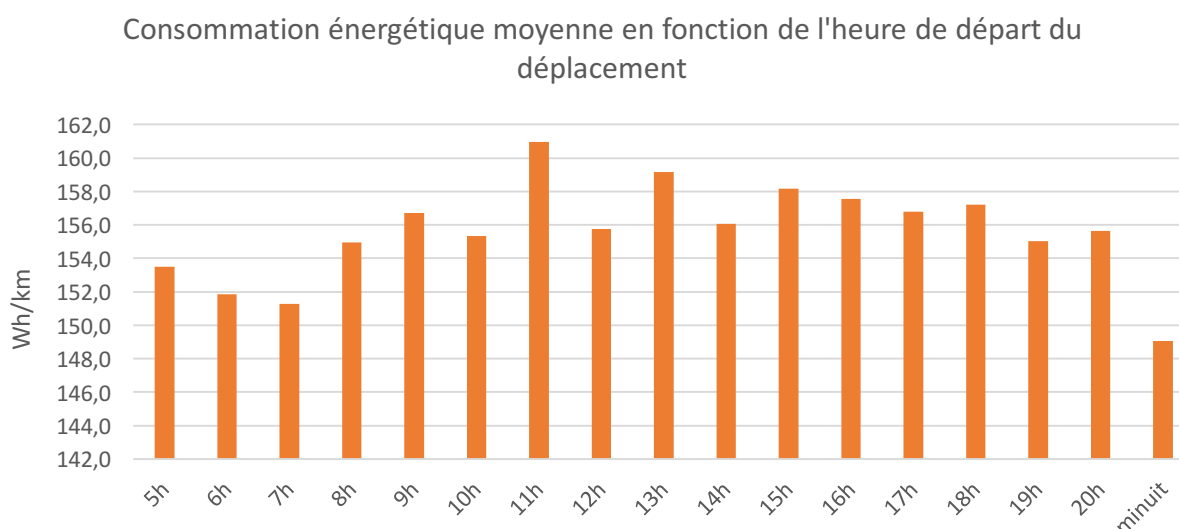


Figure 4-10 : Consommation énergétique moyenne en fonction de l'heure de départ

La consommation énergétique fluctue beaucoup en fonction de l'heure de départ. C'est à minuit que la consommation énergétique est la plus faible, étant égale à 149 Wh/km, alors que c'est à 11h00 qu'elle est la plus élevée, étant égale à 161 Wh/km. Il y a donc une différence de plus de 20 Wh/km entre la valeur la plus faible et la plus élevée. Les résultats par contre ne semblent pas triviaux. Le résultat obtenu suite au test de l'ANOVA démontre qu'aucune différence de moyennes n'est statistiquement significative. L'hypothèse de départ qui porte sur les différences de consommation énergétique en fonction de l'heure de départ est donc invalide.

Le fait d'analyser la consommation énergétique en prenant en compte seulement l'heure de départ du déplacement, sans aucun autre facteur, ne fait tout simplement pas de sens. Il a été démontré à la section 4.1.3 que les différences de comportements de conduite augmentent plus la vitesse affichée est élevée, donc il est primordial de segmenter en fonction du segment routier afin

d'analyser les différences de consommation en fonction de la journée pour laquelle le déplacement s'est effectué ainsi qu'en fonction de l'heure. Cette constatation mène à la dernière hypothèse émise à la section 3.2.2 : la combinaison des trois segmentations (type de segment, journée et heure) entraîne des différences de consommation énergétique.

4.2.4 Impacts de la combinaison des différentes segmentations sur la consommation énergétique

Pour commencer, l'analyse de la consommation énergétique suite à la segmentation des données en fonction du type de segment routier et de la journée d'enregistrement a été effectuée (les paramètres généraux des cycles de conduite ont été présentés à la section 4.1.1.2). La Figure 4-11 présente les résultats obtenus.

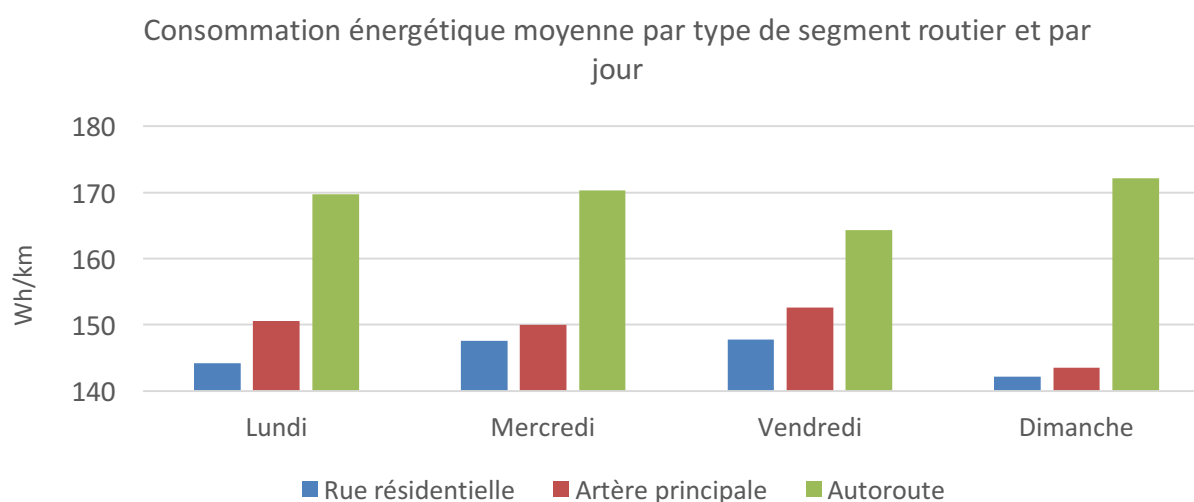


Figure 4-11 : Consommation énergétique moyenne par type de segment routier et par jour

Cette figure est très intéressante puisqu'elle démontre que la consommation d'énergie pour les véhicules électriques n'est pas constante. Il a été mentionné à la section 4.1.2.2 que la vitesse moyenne maximale et le nombre moyen de changements accélérations-décélérations minimums pour les trois types de segment routier étaient presque toujours le dimanche. Cependant, la Figure 4-11 démontre que sur une rue résidentielle et sur une artère principale la consommation énergétique la plus faible se retrouve le dimanche, alors qu'elle est la plus élevée sur autoroute. La différence n'est statistiquement pas significative entre les journées à l'étude et au sein d'un même type de segment routier sur rue résidentielle ainsi que sur autoroute, alors qu'elle l'est sur artère

principale entre le mercredi et le dimanche (valeur-p = 0,0245) et entre le vendredi et le dimanche (valeur-p = 0,0081). Cependant, lorsque les journées sont comparées entre elles suite à une segmentation entre les types de segments routiers, les différences sont statistiquement significatives (voir Tableau 4-11).

Tableau 4-11 : Valeurs-p pour évaluer la différence entre les journées à l'étude en fonction des types de segments routiers

Combinaison des segments	Valeur-p			
	Lundi	Mercredi	Vendredi	Dimanche
Résidentielle-artère	0,03	0,03	0,01	0,11
Résidentielle-autoroute	1,29E-08	2,52E-06	2,01E-06	1,96E-09
Artère-autoroute	1,87E-06	3,25E-04	1,62E-03	3,57E-09

Ces résultats démontrent qu'il y a effectivement une différence de consommation énergétique entre les trois types de segments routiers et les quatre journées à l'étude, sauf sur résidentielle et artère principale où la différence n'est pas significative le dimanche.

La Figure 4-12 présente les résultats de la moyenne de valeur de consommation énergétique obtenue suite au regroupement du lundi, mercredi et vendredi, par type de segment routier.

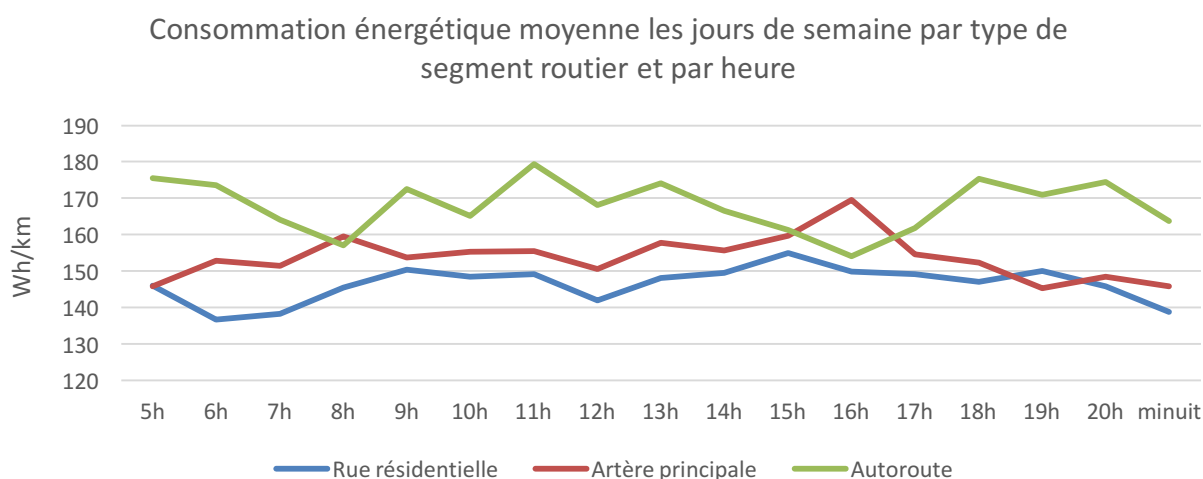


Figure 4-12 : Consommation énergétique moyenne les jours de semaine par type de segment routier et par heure

La Figure 4-12 démontre que les moyennes de consommation énergétique sur artère principale et sur rue résidentielle varient de façon assez semblable en semaine et lorsqu'elle est plus faible sur

ces deux types de segment routier, celle sur autoroute est plus élevée et vice-versa. À 8h00 et à 16h00, soit à l'heure de pointe du matin et de l'après-midi respectivement, la consommation énergétique est plus élevée sur une artère principale que sur une autoroute. La Figure 4-13 présente l'estimation de la consommation énergétique le dimanche.

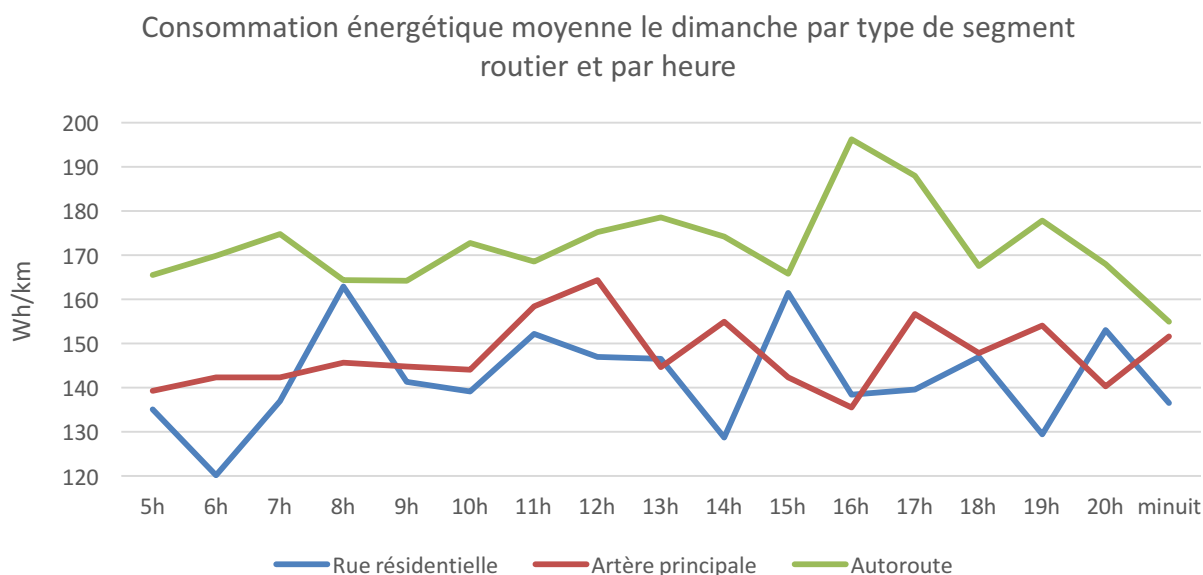


Figure 4-13 : Consommation énergétique moyenne le dimanche par type de segment routier et par heure

La consommation énergétique sur rue résidentielle et sur artère principale est plus élevée en semaine (Figure 4-12) que le dimanche (Figure 4-13), alors que sur autoroute, elle est plus faible en semaine que le dimanche. Cela signifie qu'il est préférable d'utiliser un véhicule électrique lorsque la vitesse moyenne sur autoroute est très faible par rapport à la vitesse affichée maximale, alors que c'est le contraire sur une rue résidentielle et sur une artère principale.

Pour continuer, la Figure 4-14, la Figure 4-15 et la Figure 4-16 présentent les résultats du calcul de la consommation énergétique des véhicules électriques sur leur type de segment routier respectif en fonction des journées et des heures à l'étude. La moyenne de consommation par jour est aussi présentée. Cette façon de présenter les résultats illustre bien les différences de consommation en fonction des journées à l'étude.

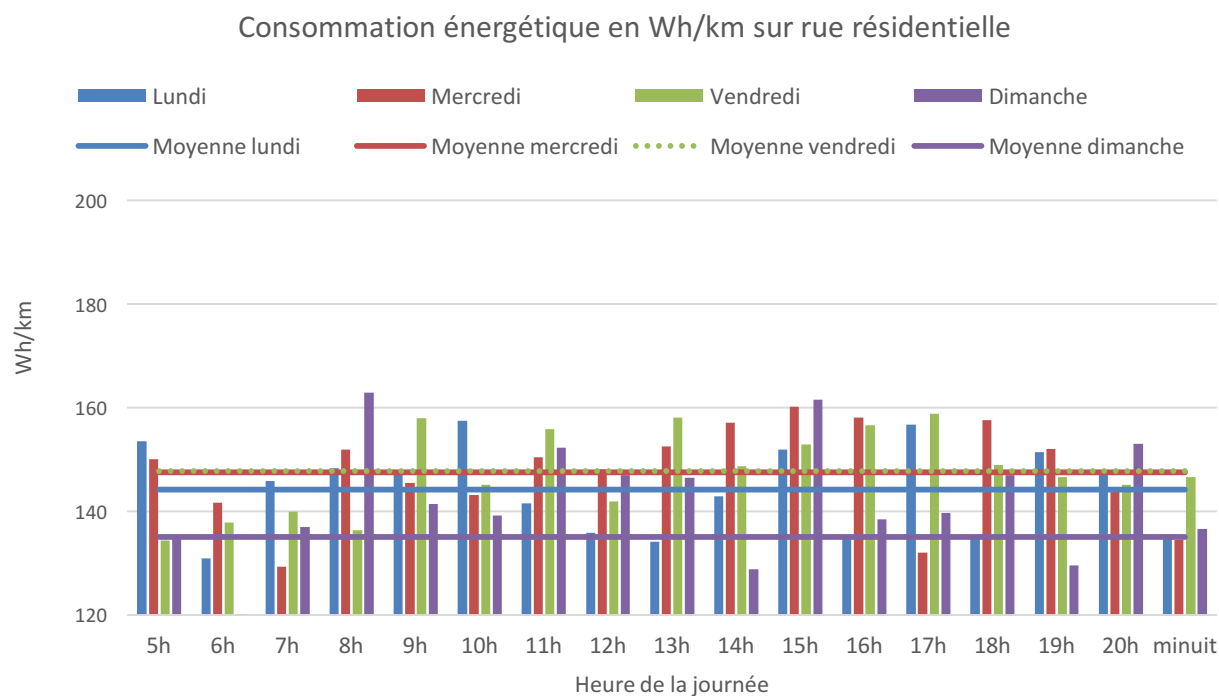


Figure 4-14 : Consommation énergétique sur rue résidentielle

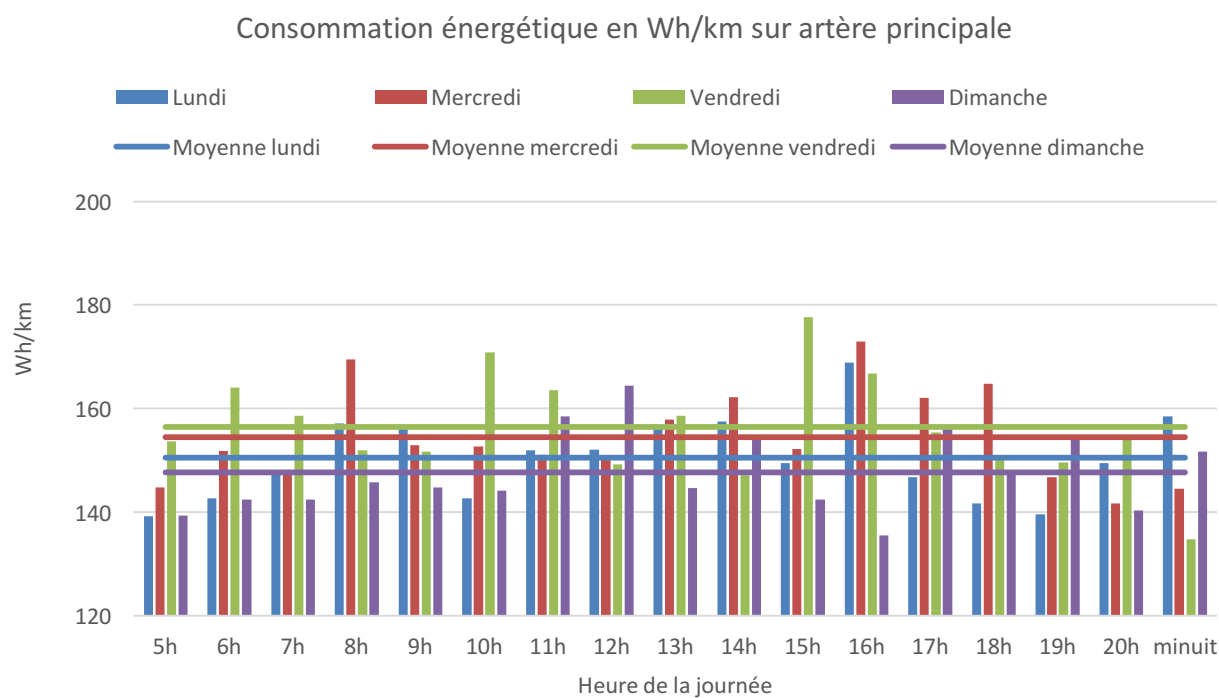


Figure 4-15 : Consommation énergétique sur artère principale

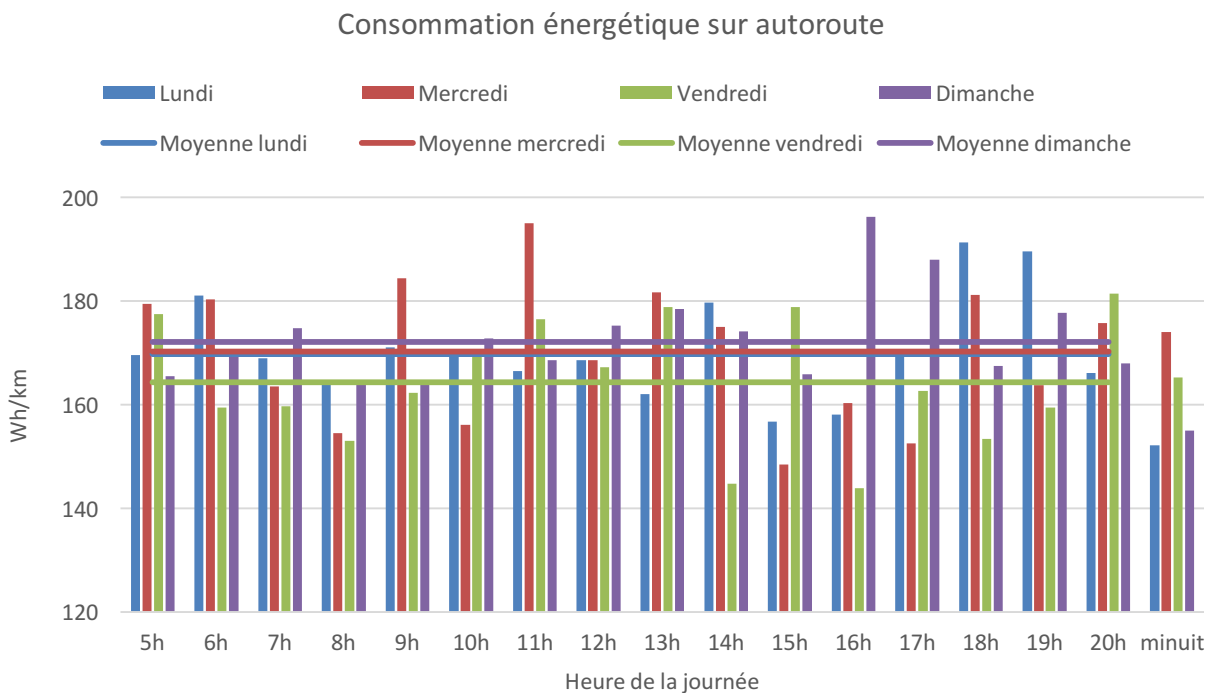


Figure 4-16 : Consommation énergétique sur autoroute

Les quatre figures suivantes présentent les résultats de consommation énergétique selon la journée d'analyse en fonction des types de segments routiers et des heures à l'étude. Cette façon de présenter les résultats illustre mieux les différences de consommation entre les différents types de segments routiers.

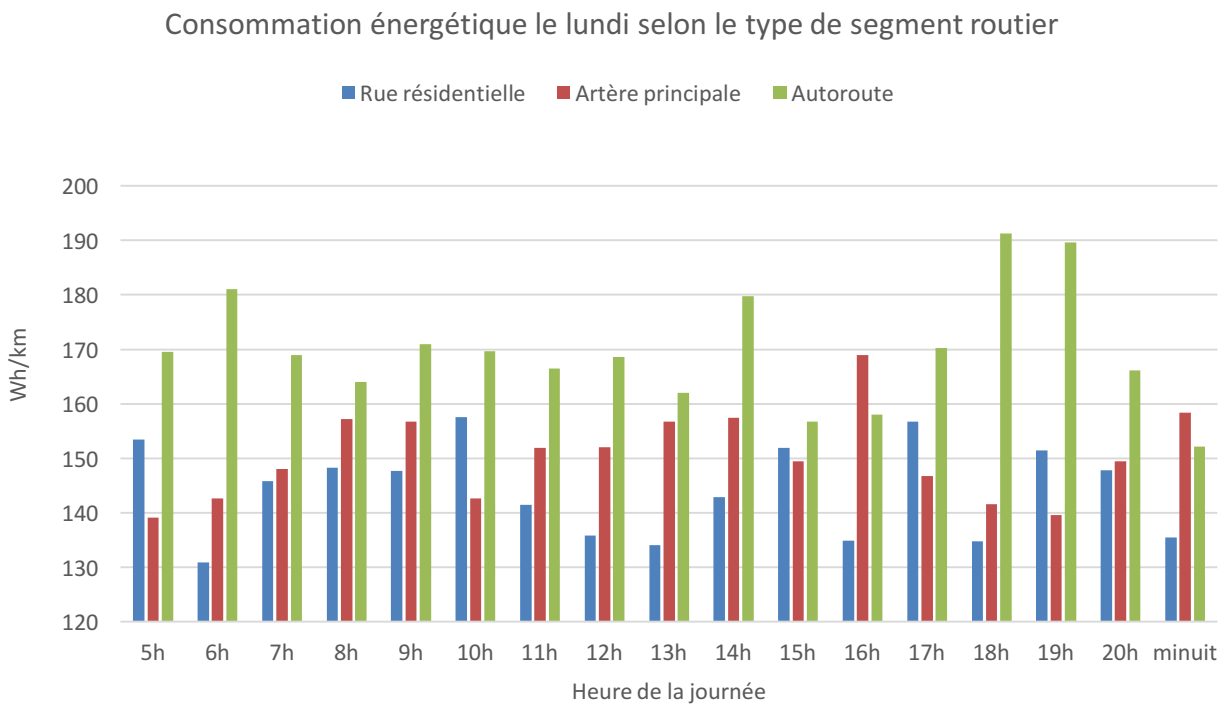


Figure 4-17 : Consommation énergétique le lundi selon le type de segment routier

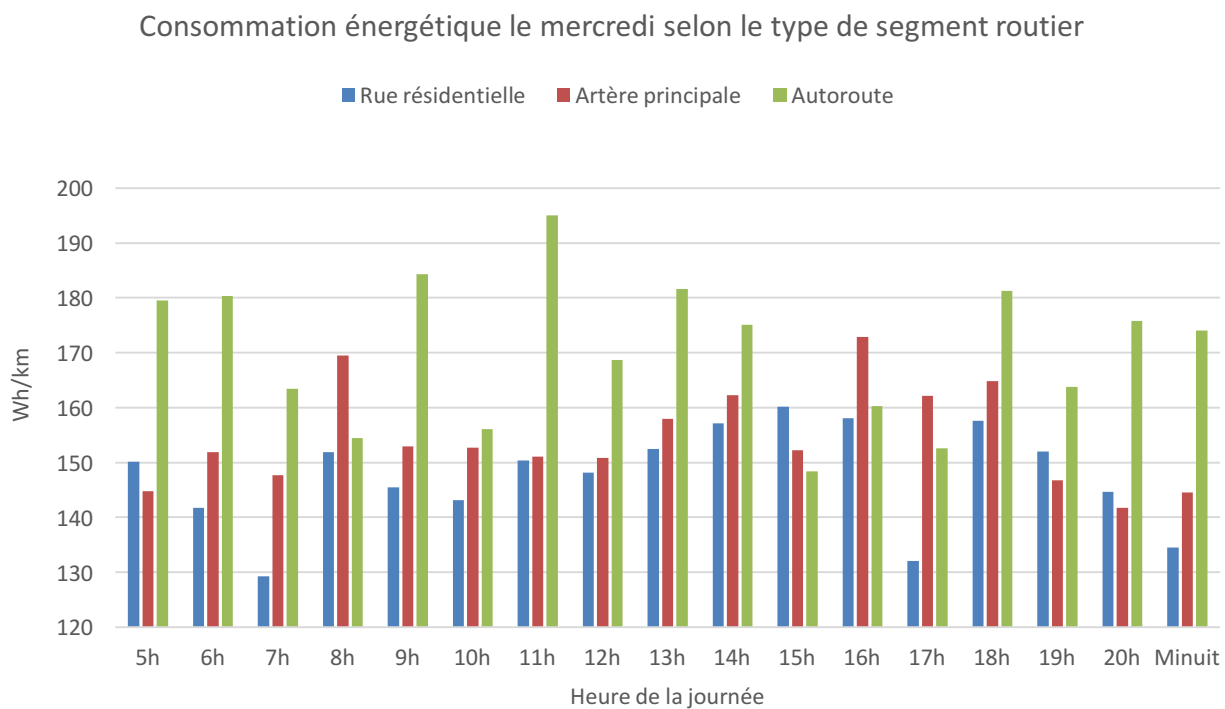


Figure 4-18 : Consommation énergétique le mercredi selon le type de segment routier

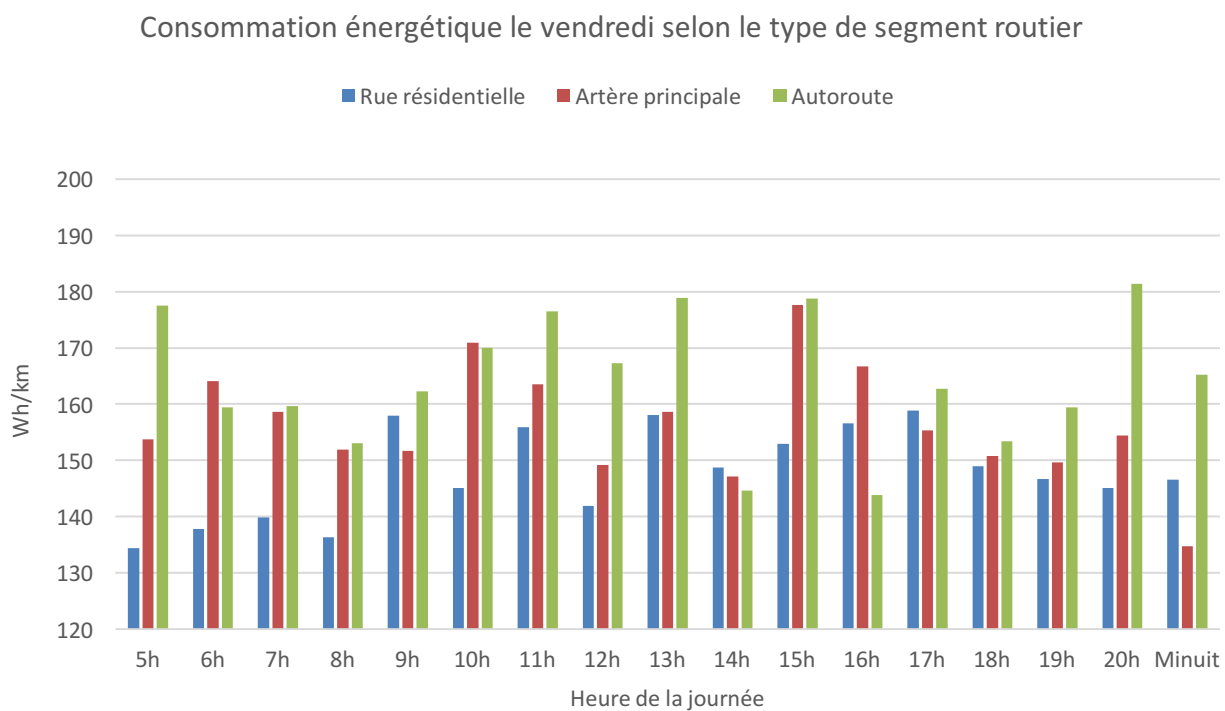


Figure 4-19 : Consommation énergétique le vendredi selon le type de segment routier

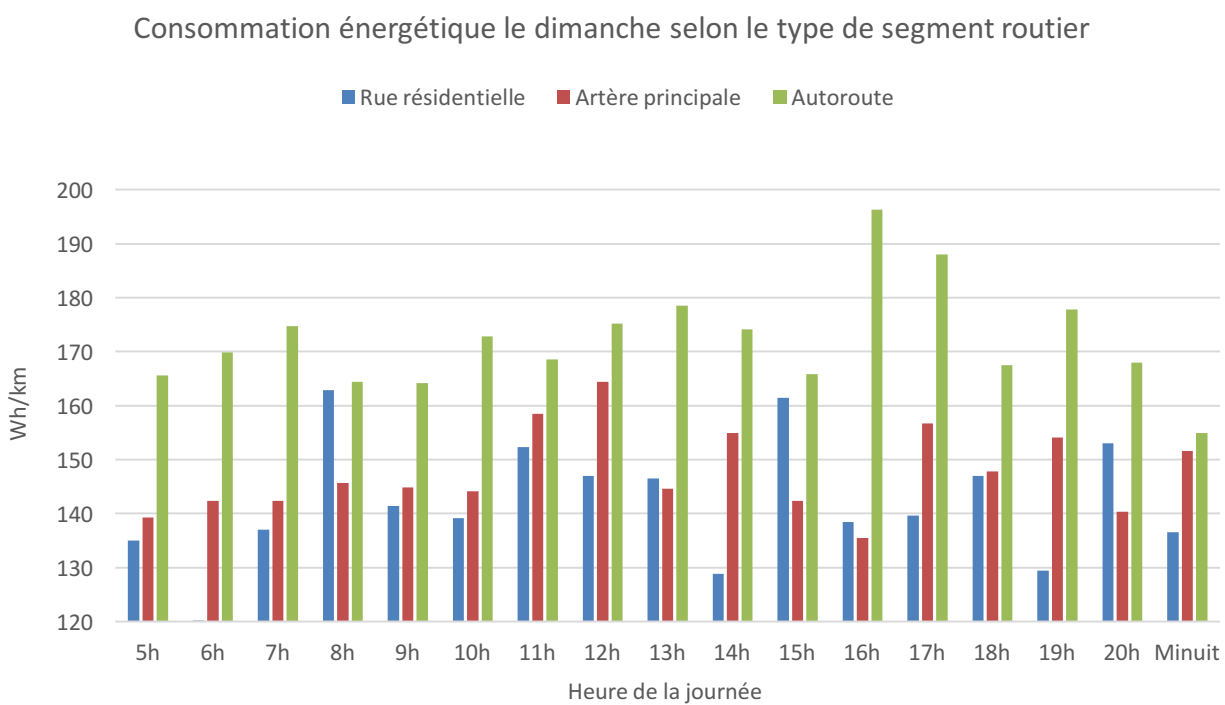


Figure 4-20 : Consommation énergétique le dimanche selon le type de segment routier

Il est intéressant de remarquer que les valeurs les plus faibles de consommation sur rue résidentielle et sur artère principale sont souvent associées aux valeurs les plus élevées sur autoroute et vice-versa. Il semble y avoir des tendances au niveau de la consommation énergétique en fonction de l'heure lors des jours de semaine, sur rue résidentielle et sur artère principale : faible tôt le matin, plus élevée à l'heure de pointe du matin, plus faible entre l'heure de pointe du matin et celle l'après-midi, plus élevée à l'heure de pointe de l'après-midi pour redescendre en fin de soirée. Le phénomène est le même sur autoroute, mais à l'inverse; lorsque la consommation est plus faible sur une artère principale, elle est plus élevée sur autoroute.

À titre de rappel, un kilowattheure est égal à 8,9 litres au 100 kilomètres équivalents; cela signifie que les consommations énergétiques entre 120 Wh/km et 200 Wh/km correspondent à une consommation entre 1 L/100 km eq. et 1,8 L/100 km eq. pour les véhicules conventionnels. Selon le Ministère des Ressources Naturelles du Canada, le véhicule conventionnel de type Fiat 124 Spider est le véhicule qui consomme le moins de carburant au Canada (Gouvernement du Canada, 2018). Ce véhicule consomme l'équivalent de 9 L/100 km en ville, 6,7 L/100 km sur route, pour une moyenne de 7,9 L/100 km lorsque combinées. Cette consommation est de 5 à 8 fois plus élevée que celle d'un véhicule électrique, en plus d'être plus nocive pour l'environnement.

4.2.5 Validation des hypothèses

Voici la conclusion au niveau des hypothèses posées à la section 3.2.2. Les hypothèses ne sont pas toutes présentes puisque certaines d'entre elles seront analysées plus tard dans ce document.

- Les comportements de conduite sont effectivement différents sur rue résidentielle et sur autoroute, ainsi que ceux sur artère principale et ceux sur autoroute, mais ne le sont pas lorsque la comparaison est effectuée entre les rues résidentielles et les artères principales.
- Les comportements de conduite sont différents en fonction des journées à l'étude.
 - Il n'y a aucune différence statistiquement significative entre les journées à l'étude;
 - Il n'y a aucune différence significative entre les comportements de conduite sur rue résidentielle, sauf entre le mercredi et le dimanche au niveau de la vitesse moyenne et de la proportion des temps de croisière;

- Il y a quelques différences significatives entre les comportements de conduite sur artère principale le lundi et le dimanche, le mercredi et le dimanche ainsi que le vendredi et le dimanche. Ces différences sont au niveau de la proportion des temps d'arrêts et des temps d'accélérations;
- Il y a de majeures différences entre les comportements de conduite sur autoroute le lundi et le dimanche, le mercredi et le dimanche ainsi que le vendredi et le dimanche.
- Il n'y a aucune différence statistiquement significative entre les comportements de conduite en fonction des heures à l'étude.
- Les différences potentielles entre les comportements de conduite étudiés ont effectivement un impact sur la consommation énergétique des véhicules électriques, notamment dû :
 - Au type de segment routier emprunté;
 - Au jour de la semaine par type de segment routier, sauf entre rue résidentielle et artère principale le dimanche où la différence n'est pas significative;
 - À l'heure de départ du déplacement, mais les variations sont différentes en fonction du type de segment routier emprunté et du jour du déplacement.
- Les différences potentielles entre les comportements de conduite étudiés n'ont aucun impact sur la consommation énergétique des véhicules électriques lorsque seuls les jours sont comparés et lorsque seules les heures sont comparées (tous les types de segments routiers confondus).

En analysant les résultats de consommation énergétique des véhicules électriques en fonction du type de segment routier, il est évident que la consommation augmente à mesure que la vitesse affichée augmente dans la majorité des cas étudiés. Or, il est possible de remarquer que la consommation énergétique sur les segments routiers ayant une limite de vitesse plus faible (rue résidentielle et artère principale) a tendance à diminuer plus la vitesse moyenne sur le segment est élevée (circulation plus fluide), alors que c'est le contraire sur l'autoroute (la consommation énergétique a tendance à diminuer lorsque la circulation est plus dense).

4.3 Consommation énergétique estimée versus rapportée

Cette section porte sur l'estimation de la consommation énergétique des véhicules électriques suite au croisement entre les enregistrements GPS et les activités reportées (méthodologie présentée à la section 3.3). Le Tableau 4-12 présente la consommation calculée des différentes courses, la consommation rapportée par les données fournies par Taxelco ainsi que la différence entre valeur rapportée et calculée en pourcentage.

Tableau 4-12 : Estimation de la consommation énergétique vs celle rapportée

Cas	Calculée		Rapportée		Différence
	Wh/km	kWh	Wh/km	kWh	%
1	224,1	1,09	164,3	0,80	-36,4%
2	144,9	6,21	138,5	5,94	-4,6%
3	159,4	1,86	154,0	1,80	-3,5%
4	171,9	0,67	171,5	0,67	-0,2%
5	186,8	3,76	198,6	4,00	5,9%
6	176,8	6,18	190,4	6,66	7,1%
7	176,7	3,26	194,9	3,60	9,3%
8	281,7	4,14	312,7	4,60	9,9%
9	138,8	0,54	156,0	0,61	11,0%
10	185,2	11,57	216,8	13,54	14,6%
11	144,0	6,49	169,9	7,65	15,2%
12	230,1	5,16	282,1	6,33	18,4%
13	155,8	4,51	199,0	5,76	21,7%
14	113,8	4,60	145,6	5,88	21,8%
15	132,4	2,24	170,5	2,89	22,4%
16	174,4	1,38	267,2	2,11	34,7%

Les résultats obtenus ne sont pas très concluants. Le cas 1, qui est le seul à être particulièrement surestimé, ne présente aucune particularité apparente au niveau des facteurs qui peuvent affecter la consommation énergétique. Par exemple, cette période d'activité rapportée a été effectuée en début septembre, à une température d'environ 20°C, l'état de chargement initial de la batterie était de 95%, le pourcentage des temps d'arrêts est égal à 23%, le temps de conduite est de 00:12:38 et la distance parcourue de 1,16 kilomètres. Ces valeurs au niveau des différents facteurs se retrouvent tous au moins une fois dans les autres courses, mais c'est seulement dans le cas 1 que la consommation calculée est beaucoup plus élevée que celle rapportée. Le résultat est donc, pour le moment, inexplicable.

Mis à part le premier cas, le calcul de la consommation énergétique a tendance à sous-estimer la consommation réelle de façon générale. Cela peut simplement être dû à la sous-estimation de la masse des passagers et du module qui est sur le toit des taxis. En utilisant une masse supplémentaire de 500 kg au lieu de 150 kg, la différence de consommation diminue d'environ 7%. Cela signifie que si le cas 5, 6, 7 et 8 avaient effectivement un chargement de 500 kg dans le véhicule, la différence de consommation entre celle rapportée et celle estimée aurait été de moins de $\pm 3\%$.

Finalement, les facteurs qui influencent la consommation énergétique d'un véhicule électrique sont tellement nombreux et difficiles à estimer dans certains cas qu'il devient presque impossible d'être en mesure d'estimer précisément la consommation. La vitesse du vent par exemple, la qualité de la chaussée ou même les fenêtres ouvertes dans le véhicule sont des facteurs qui influencent la consommation. Il serait utile d'avoir les données de l'état de chargement de la batterie instantané en complémentarité aux données GPS; cela permettrait de mieux comprendre ce qui se passe réellement et de mieux valider l'estimation au fur et à mesure que le véhicule se déplace. Plus de données de consommation permettront en outre de poursuivre ces analyses.

4.4 Consommation énergétique estimée des portions de courses effectuées dans le secteur à l'étude et au sein du sous-ensemble de segments routiers

Pour commencer, les valeurs estimées de consommation énergétique issues des cycles de conduite ont tendance à surestimer la consommation par rapport aux valeurs obtenues issues des portions de courses sélectionnées dans le secteur à l'étude et au sein du sous-ensemble de segments routiers sélectionné. Les six prochaines figures démontrent la consommation estimée sur chacune des portions de courses (bandes bleues) et la valeur estimée de leur cycle de conduite respectif (droite orangée).

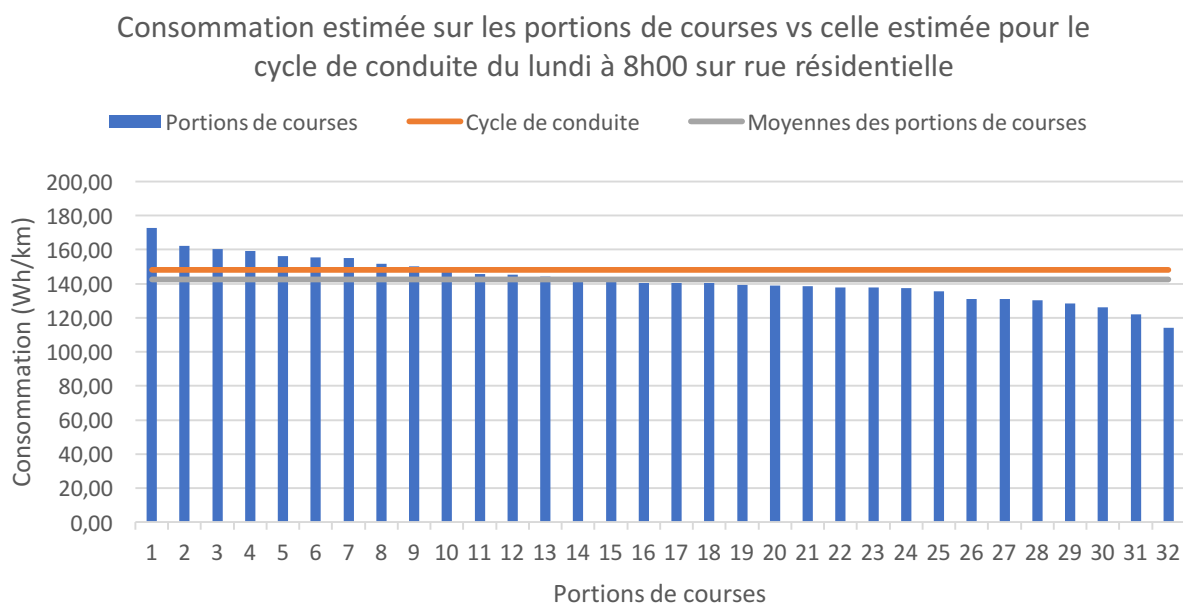


Figure 4-21 : Portions de courses le lundi à 8h00 sur rue résidentielle

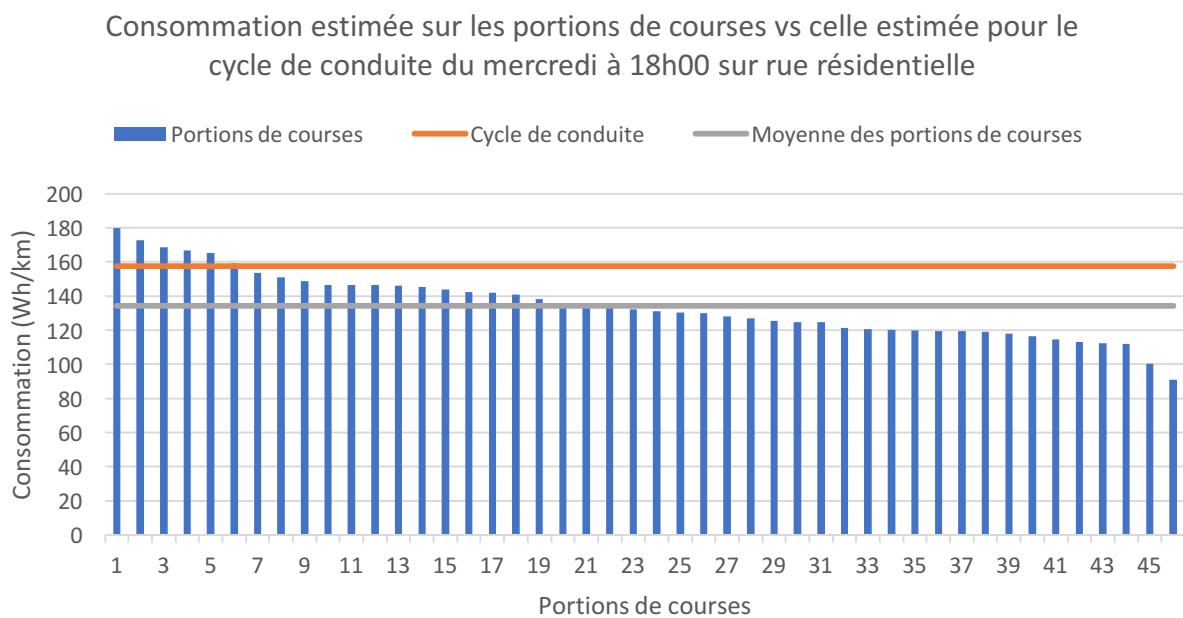


Figure 4-22 : Portions de courses le mercredi à 18h00 sur rue résidentielle

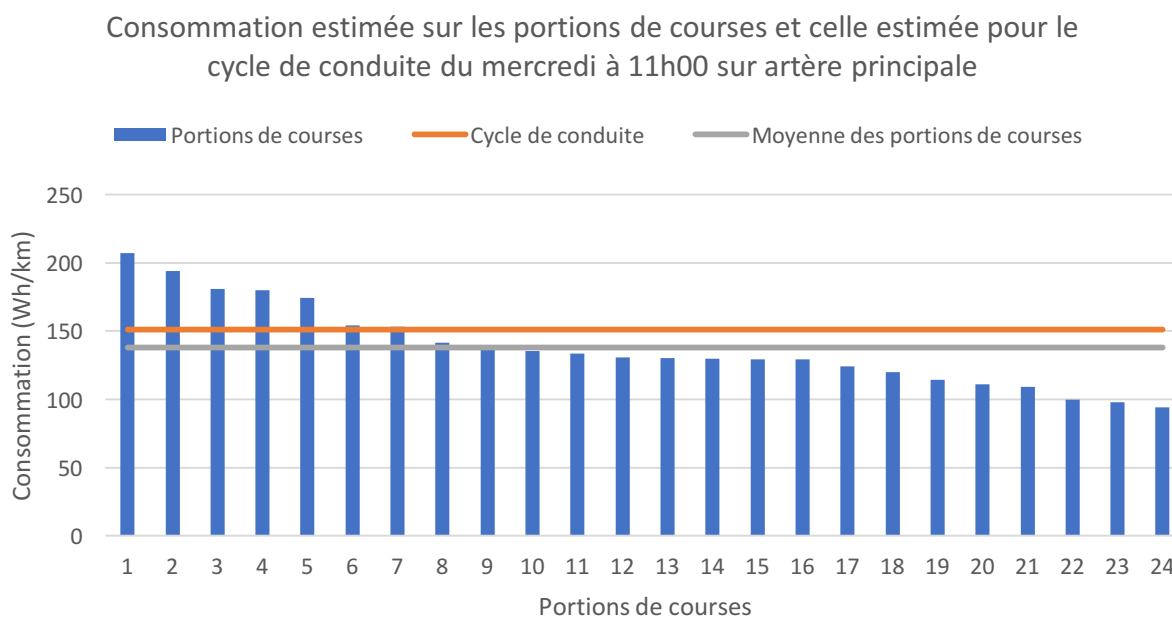


Figure 4-23 : Portions de courses le mercredi à 11h00 sur artère principale

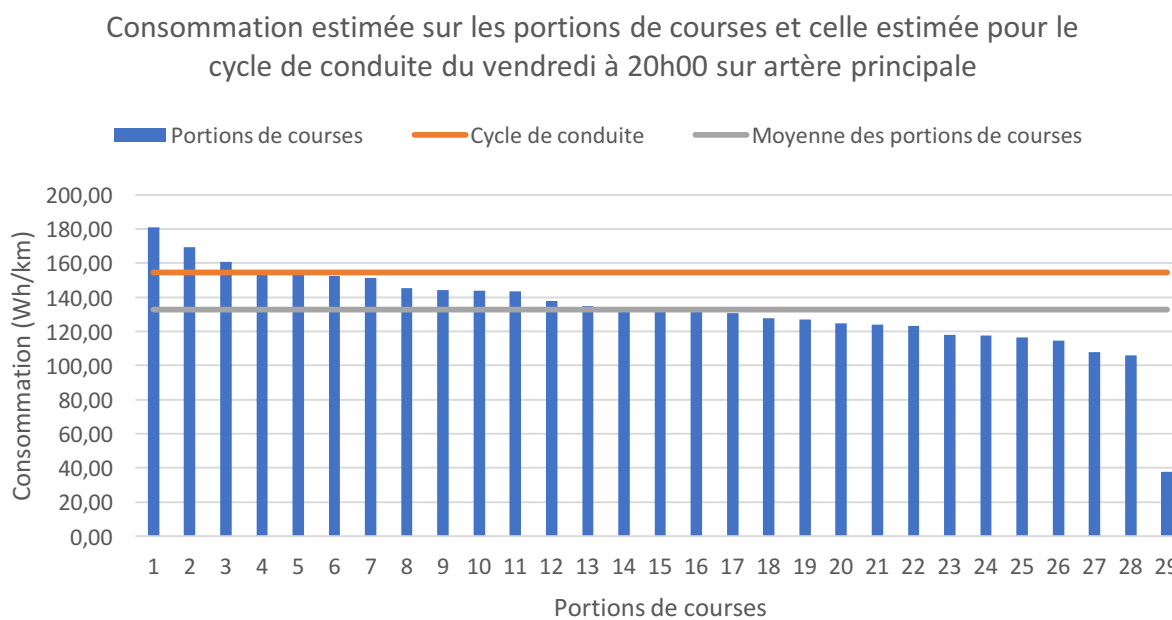


Figure 4-24 : Portions de courses le vendredi à 20h00 sur artère principale

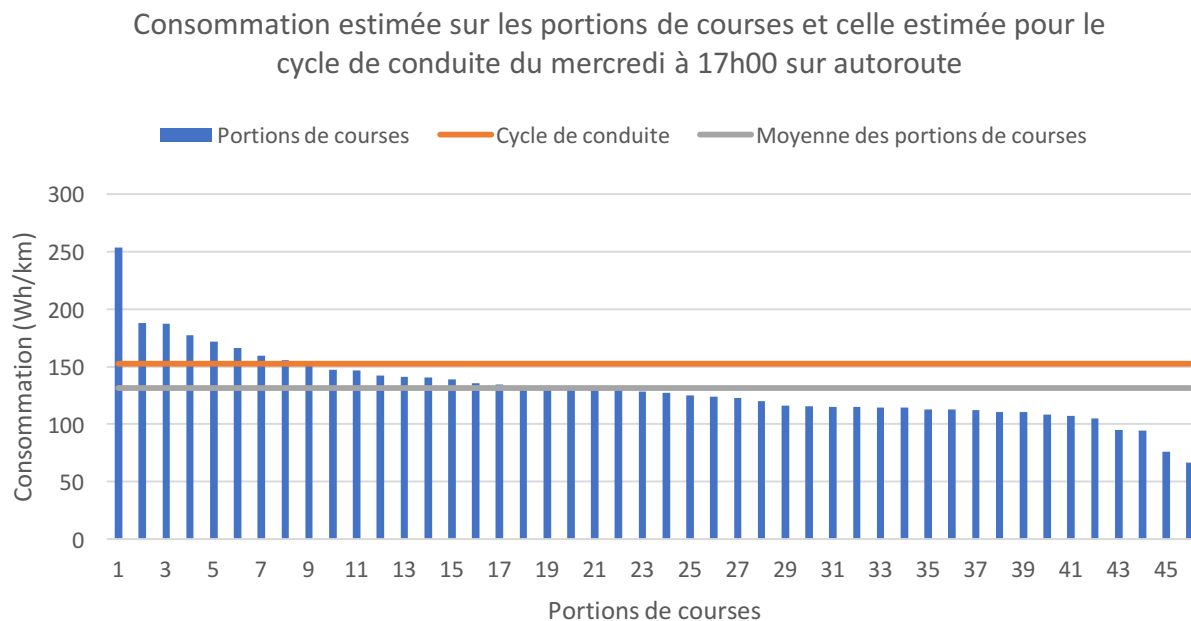


Figure 4-25 : Portions de courses le mercredi à 17h00 sur autoroute

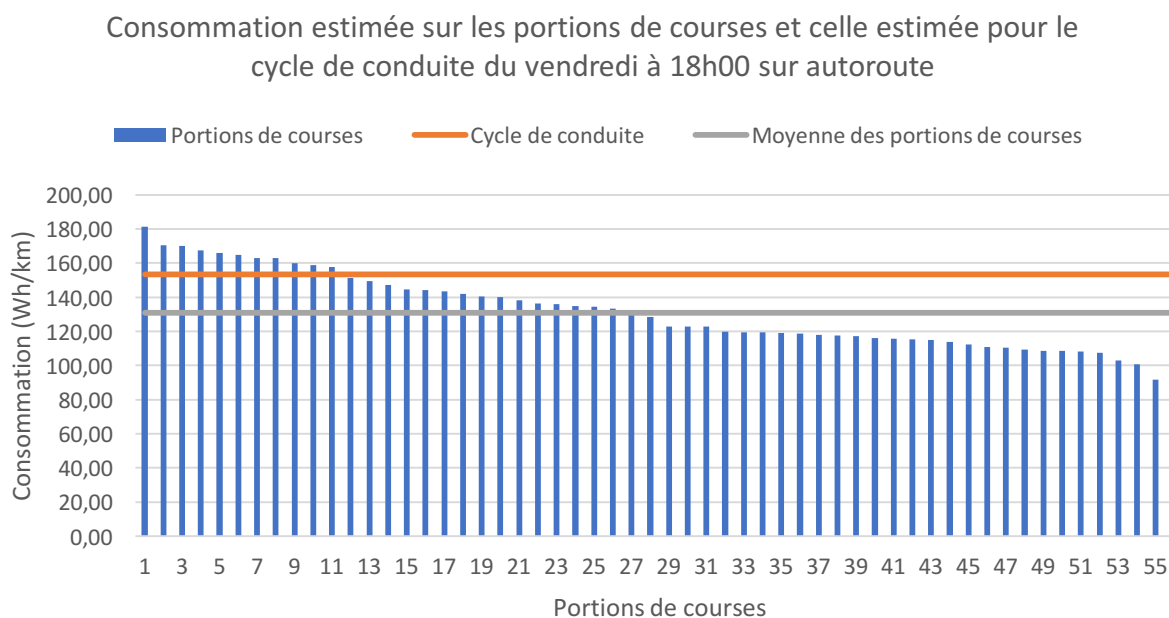


Figure 4-26 : Portions de courses le vendredi à 18h00 sur autoroute

Il est possible de remarquer que les valeurs estimées de consommation énergétique issues des cycles de conduite sont très souvent supérieures aux valeurs estimées des portions de courses. Il y a tout de même, pour les six cas présentés précédemment, toujours quelques valeurs de

consommation énergétique estimées provenant des portions de courses qui sont supérieures à celles provenant des cycles de conduite, mais elles sont toujours en infériorité par rapport au nombre de portions de courses total. Il est donc possible de conclure que les valeurs obtenues de consommation énergétique issues des cycles de conduite ont tendance à surestimer les valeurs. De plus, la moyenne de la consommation énergétique issue des portions de courses est, dans tous les cas, inférieure à celle du cycle de conduite.

L'écart en pourcentage entre les valeurs estimées provenant des cycles de conduite et celles provenant des portions de courses a été calculé à l'aide de l'équation 4-1 suivante:

$$\text{Écart (\%)} = \frac{\text{valeur estimée portion de course} - \text{valeur estimée cycle}}{\text{valeur estimée portion de course}} \quad \text{Équation 4-1}$$

Les portions de courses ont été segmentées de la même manière que les cycles de conduite développés, soit en fonction du type de segment routier ainsi qu'en fonction de la journée et de l'heure. Parmi les hypothèses émises à la section 3.2.2, l'une d'elle proposait que le mercredi soit représentatif du mardi et du jeudi et une autre proposait que le dimanche soit représentatif du samedi. De plus, les valeurs obtenues à minuit ont été supposées être représentatives des valeurs obtenues la nuit, soit entre 21h00 et 4h00. Le choix des valeurs estimées est donc basé sur ces hypothèses. La Figure 4-27 présente la distribution du nombre de portions de course en fonction des écarts en pourcentage obtenus entre les valeurs de consommation estimées issues des portions de courses et celles issues de leur cycle de conduite respectif en fonction des jours, calculés à l'aide de l'équation 4-1. Il est important de porter attention à la Figure 4-28 qui suit la Figure 4-27 pour être en mesure de faire une analyse éclairée sur la distribution des écarts puisque le nombre d'observations n'est pas équivalent d'une journée à l'autre.

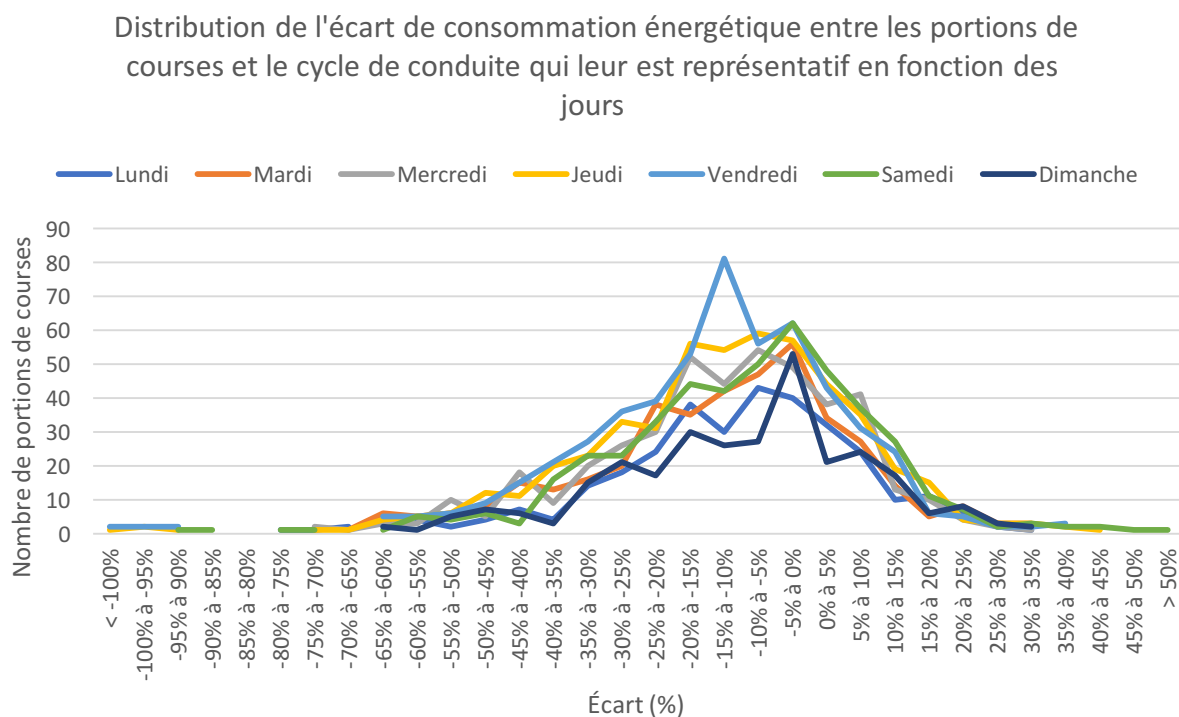


Figure 4-27 : Distribution du nombre de portions de courses et de leur écart en fonction des jours

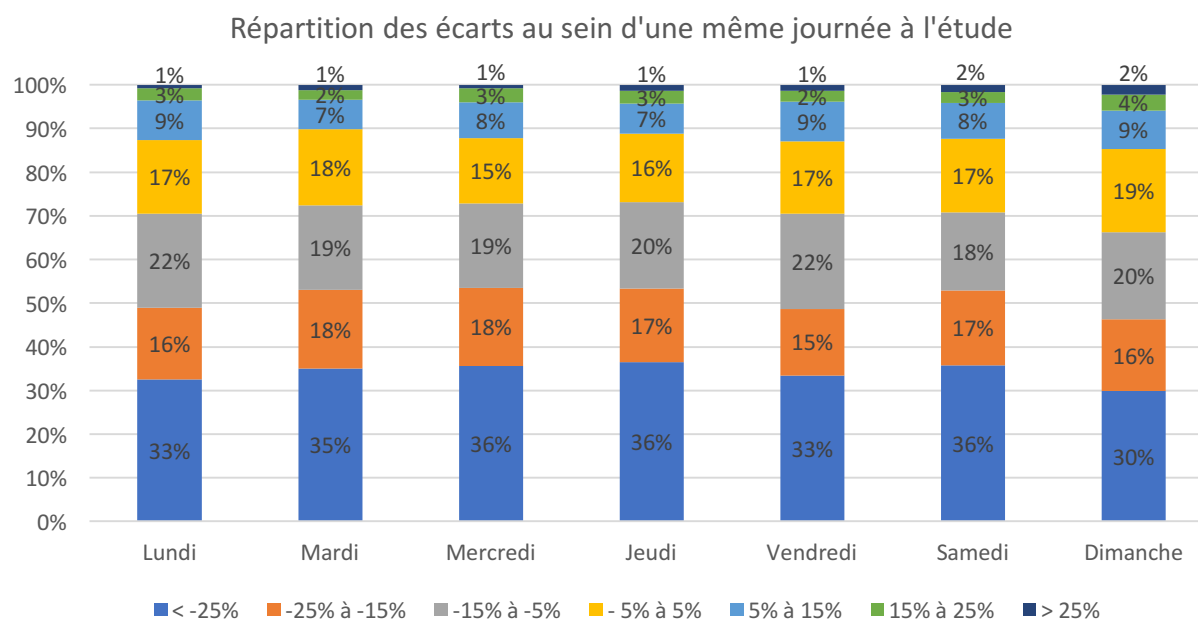


Figure 4-28 : Répartition des écarts au sein des journées à l'étude

La distribution des écarts est assez semblable d'une journée à l'autre. Le mardi et le dimanche sont les journées pour lesquelles le pourcentage d'écart entre -0,5% et 0,5% domine. Il est possible de voir sur la Figure 4-28 que le modèle estime bien la consommation énergétique d'environ une course sur quatre effectuée le dimanche. La Figure 4-29 illustre elle aussi la distribution des écarts, mais en fonction des types de segments routiers afin de vérifier s'il y a une tendance à ce niveau.

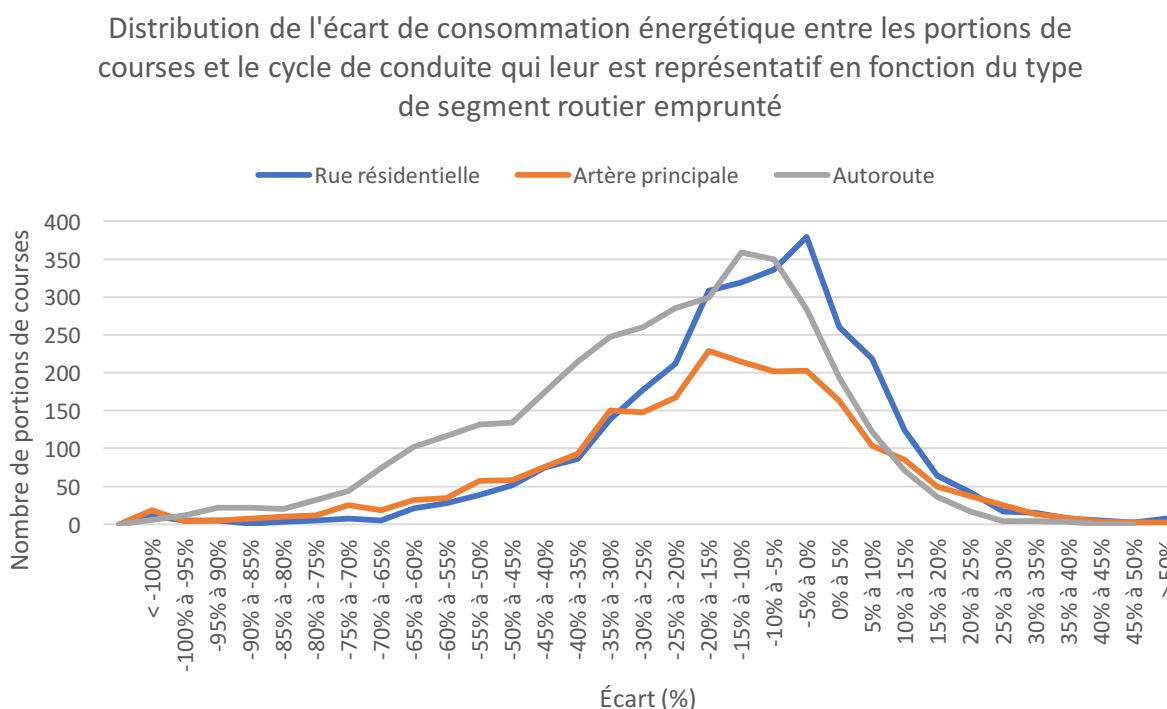


Figure 4-29 : Distribution fréquentielle de l'écart en fonction du type de segment routier

Il semble que les portions de courses sur autoroute soient majoritairement sous-estimées et l'estimation de la consommation énergétique des portions de courses sur rue résidentielle semble être celle qui est le plus près des cycles de conduite développés. Voici une dernière représentation de l'écart en pourcentage qui permet de bien illustrer les différences entre les types de segments routiers (Figure 4-30).

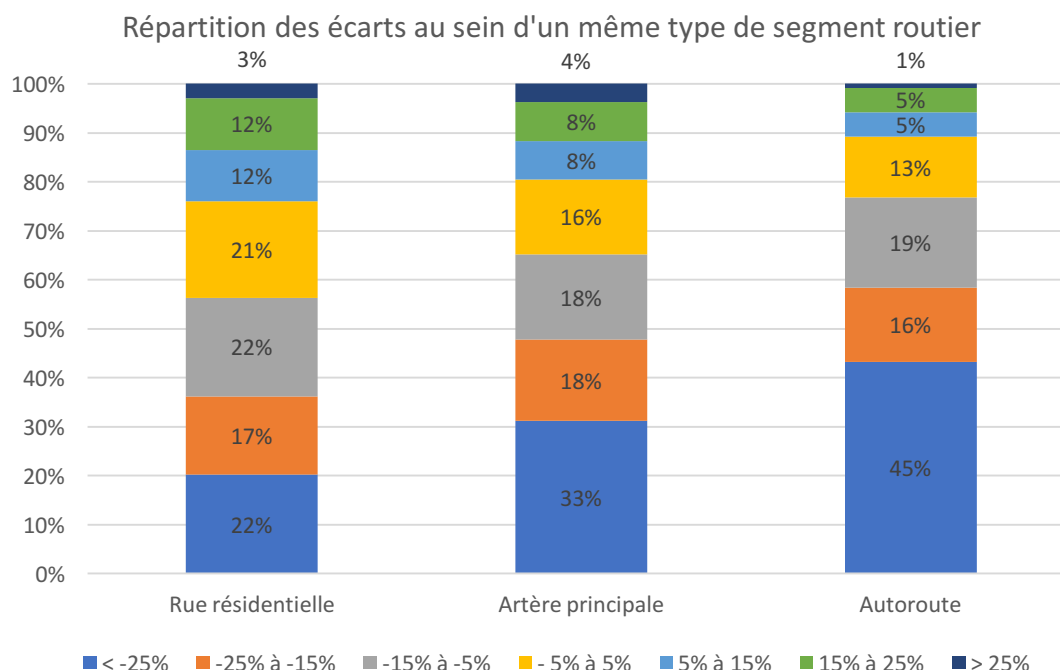


Figure 4-30 : Répartition des écarts par type de segment routier

Effectivement, ce sont les portions de courses sur rue résidentielle qui sont les mieux représentées par les cycles de conduite développés en termes d'estimation de la consommation énergétique. L'écart type de la différence entre les estimations de consommation sur les courses et les cycles de conduite sur rue résidentielle, artère principale et autoroute est égal à 27,0, 28,0 et 26,0 respectivement. Ce résultat signifie que malgré tout, ce sont les portions de courses sur autoroute qui détiennent la dispersion autour de la moyenne par type de segment routier la moins élevée.

Pour continuer, quelques estimations de consommation provenant de certaines portions de courses semblaient aberrantes (voir Tableau 4-13).

Tableau 4-13 : Valeurs erronées extrêmes

Type de segment	Jour	Heure	Distance (km)	Énergie estimée sur la portion de course (Wh/km)	Énergie estimée sur le cycle de conduite représentatif (Wh/km)	Écart (%)
Autoroute	Jeudi	21h00	1,06	-2,4	174	7377%
Résidentiel	Vendredi	16h00	0,63	-31,4	156,6	598%
Résidentiel	Mardi	23h00	0,28	1,1	134,5	-12085%
Autoroute	Samedi	14h00	1,08	28,4	174,2	-513%
Autoroute	Samedi	18h00	1,17	26,5	167,5	-531%
Autoroute	Jeudi	9h00	1,04	34,4	184,3	-435%
Artère	Vendredi	3h00	0,76	26,6	134,8	-406%

Les deux premières valeurs de consommation énergétique en Wh/km présentées au Tableau 4-13 sont évidemment aberrantes; elles signifient que le véhicule aurait produit de l'énergie plus il se déplace au lieu d'en dépenser. Ce sont les deux seules observations sur les 8 923 observations qui ont une consommation négative. Probablement que le véhicule était dans une phase de décélération pour l'entièreté de la portion de la course qui a été utilisée. Les cinq valeurs suivantes présentent une consommation énergétique très faible par rapport à ce qui peut être attendu. D'ailleurs, un nombre élevé d'observations présentent des valeurs de consommation très faibles par rapport à ce qui peut être attendu (moins de 50 Wh/km). Encore une fois, il est possible que la portion de la course qui a été utilisée pour le calcul de la consommation énergétique était majoritairement composée de décélération. Les sept valeurs présentées au Tableau 4-13 ont été supprimées de la base de données pour la prochaine analyse puisqu'elles sont peu nombreuses à présenter un pourcentage d'écart si important et l'abstraction de ces valeurs permet de mieux représenter graphiquement l'analyse suivante. La Figure 4-31 présente la distribution des écarts en pourcentage en fonction de la distance parcourue sans les sept valeurs aberrantes et sans les portions de courses ayant une distance parcourue de plus de 12 kilomètres. Les portions de courses de plus de 12 kilomètres seront présentées à la Figure 4-32.

Écart en pourcentage entre les valeurs estimées de consommation issues des portions de courses et celles issues des cycles de conduite par rapport à la distance parcourue en km

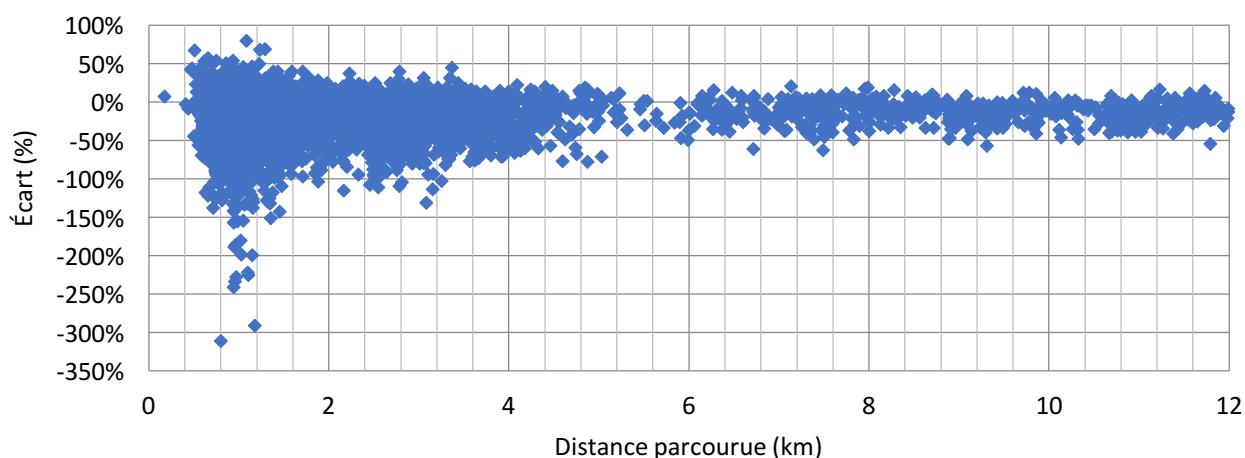


Figure 4-31 : Écart en pourcentage en fonction de la distance parcourue

Il est possible de remarquer que les courses qui présentent les écarts les plus élevés ont toutes des distances faibles. Lorsque l'écart est inférieur -150% ou supérieur à 50% (à savoir les écarts extrêmes), les courses ont toutes une distance parcourue de moins de deux kilomètres. La Figure 4-32 présente l'écart en pourcentage entre les valeurs observées et les valeurs estimées de toutes les observations qui ont une distance supérieure à 5 kilomètres, soit 9,2% de la totalité des portions de courses sélectionnées dans les secteurs à l'étude.

Pourcentage d'écart entre la valeur observée et la valeur estimée pour les courses ayant une distance parcourue supérieure à 5 km

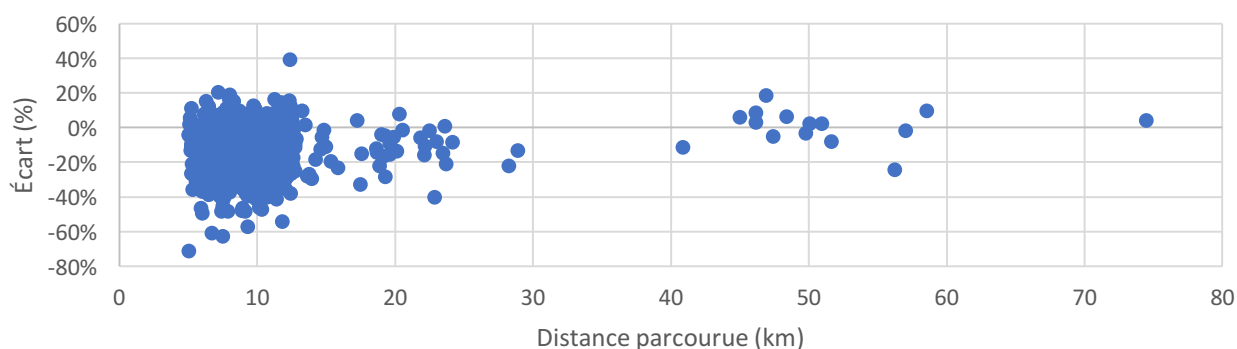


Figure 4-32 : Écart entre la valeur observée et la valeur estimée pour les courses d'une distance de plus de 5 kilomètres

Les écarts ont tendance à diminuer avec la distance parcourue. Ce phénomène pourrait être relié au fait que ce sont des portions de course qui ont été utilisées et non des courses complètes. Comme mentionné plus tôt, peut-être que les portions utilisées sont composées davantage d'accélération ou de décélérations, ce qui aurait tendance à biaiser les résultats. Il serait important d'utiliser des courses complètes afin de valider cette hypothèse. De plus, la distance parcourue des courses utilisées pour le développement des cycles de conduite se situait entre 3 et 6 kilomètres sur rues résidentielles et artères principales et elle se situait entre 10 et 17 kilomètres sur autoroute. La distance parcourue est très variable d'un cycle à l'autre puisqu'elle dépend de la vitesse moyenne et des temps d'arrêts. Effectivement, lors du processus de développement des cycles de conduite, les micro-segments sont ajoutés un à un jusqu'à ce que le temps moyen des courses présentes dans la base de données soit atteint. Cette particularité entraîne donc des différences importantes au niveau de la distance parcourue par cycle de conduite. Or, les distances moyennes parcourues des portions de courses se situent entre 1 et 2 kilomètres sur rues résidentielles et sur artères principales et entre 4 et 5 kilomètres sur autoroute. Il aurait peut-être été préférable d'utiliser un critère se basant sur la distance moyenne parcourue plutôt que sur le temps moyen lors du développement des cycles de conduite et d'utiliser des portions de courses équivalentes à la distance de leur cycle de conduite équivalent pour la comparaison de la consommation énergétique. Le phénomène de diminution des pourcentages d'écarts par rapport à l'augmentation de la distance parcourue pourrait venir confirmer les travaux effectués en Chine qui proposent que les cycles de conduite standards deviennent représentatifs lorsque la durée des courses est supérieure à 154 minutes (Eisele et al., 2016).

4.4.1 Journées et heures représentatives

Dans cette section, les hypothèses suivantes seront analysées :

- Les comportements de conduite du mercredi sont représentatifs de ceux du mardi et du jeudi;
- Les comportements de conduite du dimanche sont représentatifs de ceux du samedi;
- Les comportements de conduite à minuit sont représentatifs de ceux entre 21h00 et 4h00.

Voici les résultats obtenus de consommations énergétiques calculées à partir des portions de courses situées dans les secteurs à l'étude (Figure 4-33).

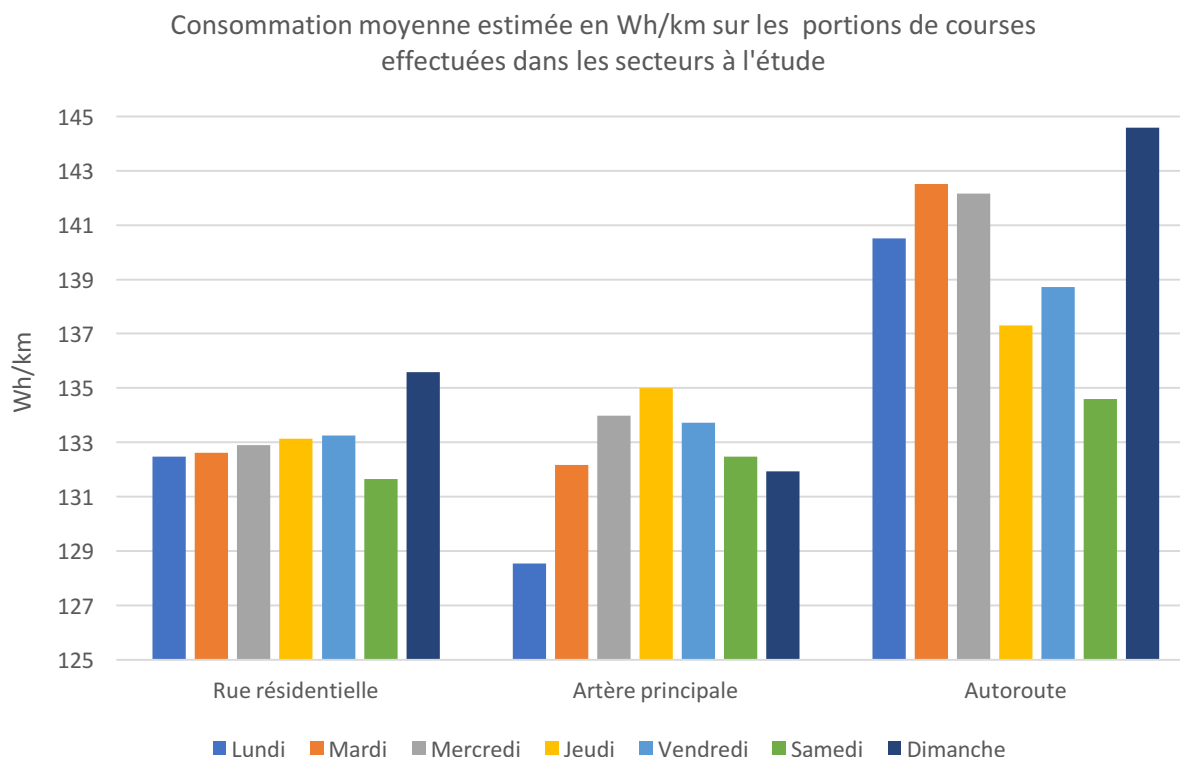


Figure 4-33 : Consommation énergétique moyenne estimée sur les portions de courses

Le Tableau 4-14, le Tableau 4-15 et le Tableau 4-16 présentent les résultats obtenus (toujours avec un intervalle de confiance de 95%) suite à l'application du test de Student pour valider les différences entre les jours :

Tableau 4-14 : Valeur-p suite au test de Student sur rue résidentielle

	Valeur-p						
	Lundi	Mardi	Mercredi	Jeudi	Vendredi	Samedi	Dimanche
Lundi	-						
Mardi	0,9734	-					
Mercredi	0,5590	0,5756	-				
Jeudi	0,7671	0,7919	0,7172	-			
Vendredi	0,5621	0,5812	0,9228	0,7498	-		
Samedi	0,9565	0,9304	0,5373	0,7317	0,5388	-	
Dimanche	0,6404	0,6544	0,9690	0,7651	0,9115	0,6198	-

La différence des valeurs moyennes de consommation énergétique estimées sur les portions de courses est statistiquement non significative lorsque les journées sont comparées entre-elles sur rue résidentielle. Cela signifie que les moyennes calculées ne présentent pas assez de différences importantes entre les journées.

Tableau 4-15 : Valeur-p suite au test de Student sur artère principale

	Valeur-p						
	Lundi	Mardi	Mercredi	Jeudi	Vendredi	Samedi	Dimanche
Lundi	-						
Mardi	0,8230	-					
Mercredi	0,3937	0,5077	-				
Jeudi	0,4041	0,5230	0,9683	-			
Vendredi	0,0815	0,9926	0,4671	0,4806	-		
Samedi	0,1482	0,0729	0,0141	0,0126	0,0449	-	
Dimanche	0,3598	0,2363	0,0726	0,0717	0,2004	0,6788	-

Il est intéressant de voir que la différence de la moyenne de la consommation énergétique du samedi est statistiquement significative par rapport au mardi, mercredi, jeudi et vendredi. Elle est aussi non significative par rapport au dimanche, ce qui peut appuyer l'hypothèse que le dimanche est représentatif du samedi. La valeur-p la plus élevée par rapport au jeudi est celle du mercredi, ce qui peut prouver aussi que le mercredi est bien représentatif du jeudi. Or, cela n'est pas vrai pour le mardi : le vendredi semble est la journée la plus représentative.

Tableau 4-16 : Valeur-p suite au test de Student sur autoroute

	Valeur-p						
	Lundi	Mardi	Mercredi	Jeudi	Vendredi	Samedi	Dimanche
Lundi	-						
Mardi	0,9502	-					
Mercredi	0,7677	0,7021	-				
Jeudi	0,0866	0,0600	0,1153	-			
Vendredi	0,0712	0,0473	0,0938	0,9537	-		
Samedi	0,0003	0,0001	0,0003	0,0390	0,0398	-	
Dimanche	0,0118	0,0103	0,0031	0,0000	0,0000	0,0000	-

Ce dernier tableau démontre qu'il y a une différence statistiquement significative entre le samedi et le dimanche. L'hypothèse que le dimanche peut être représentatif du samedi sur autoroute est donc infirmée. Le samedi semble être une journée unique puisqu'elle a des différences statistiquement significatives avec toutes les autres journées. Le mercredi semble être représentatif du mardi et du jeudi, mais probablement que le jeudi serait mieux représenté par le vendredi.

La prochaine figure présente les valeurs moyennes estimées de consommation énergétique sur les portions de courses la nuit, soit entre 21h00 et 4h00, sur rue résidentielle le lundi. Selon l'hypothèse de la représentativité des comportements de conduite à minuit, les résultats devraient être semblables (voir Figure 4-34).

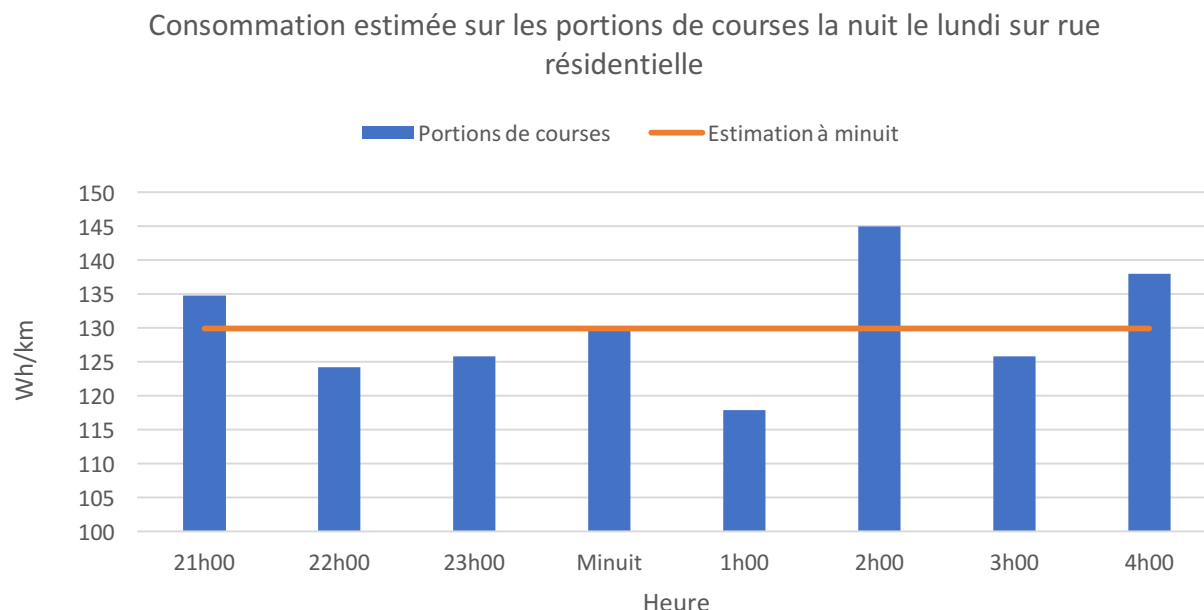


Figure 4-34 : Consommation énergétique moyenne estimée sur les portions de courses la nuit

La Figure 4-34 démontre qu'il semble y avoir une différence entre les moyennes estimées de consommation énergétique pour chacune des heures la nuit. Le test de Student a été utilisé afin de faire la comparaison des moyennes observées (issues portions de courses) à une moyenne théorique (issue du cycle de conduite représentatif à minuit). Le Tableau 4-17 présente les résultats obtenus.

Tableau 4-17 : Valeur-p suite au test de Student sur les portions de courses la nuit

	Valeur-p		
	Rue résidentielle	Artère principale	Autoroute
Lundi	0,1088	0,0000	0,7072
Mardi	0,0028	0,0006	0,0000
Mercredi	0,1067	0,0013	0,0000
Jeudi	0,5553	0,0003	0,0000
Vendredi	0,0000	0,0000	0,0000
Samedi	0,2885	0,0000	0,0000
Dimanche	0,7319	0,0000	0,0267

Il y a seulement sur rue résidentielle le lundi, mercredi, jeudi, samedi et dimanche ainsi que sur autoroute le lundi que la différence entre les moyennes de la consommation énergétique estimées sur les portions de courses et la valeur cible provenant du cycle de conduite correspondant est statistiquement non significative. Pour ces cinq cas, la moyenne de la consommation énergétique peut être représentée celle estimée du cycle de conduite correspondant, alors que pour les autres cas ce n'est pas possible.

4.4.2 Comparaison entre les valeurs brutes et les valeurs interpolées et lissées

Pour terminer, une dernière analyse a été effectuée sur certaines données GPS du secteur à l'étude. Une comparaison a été effectuée entre les valeurs de consommation énergétique obtenues à partir des données GPS brutes et celles qui ont été modifiées suite à l'interpolation et au lissage des données. Cette analyse permet de vérifier si les résultats de consommation obtenus tout au long de cette recherche sont plus faibles que ceux attendus à cause du traitement de données effectué. Une petite portion de la course 21 (id_course = 21) a été sélectionnée au hasard afin de représenter l'impact du traitement de données sur l'estimation de la consommation énergétique. Cette course a été effectuée un dimanche (le 3 juillet 2016) entre 15h00 et 16h00. La Figure 4-35 démontre la différence entre les valeurs de vitesses brutes et les valeurs de vitesses lissées et interpolées sur 22 secondes de la portion de course en question. De plus, il est possible de voir sur la Figure 4-36 la représentation de cette portion de course sur QGIS.

Valeurs de vitesses brutes et valeurs de vitesses interpolées et lissées sur la portion de course

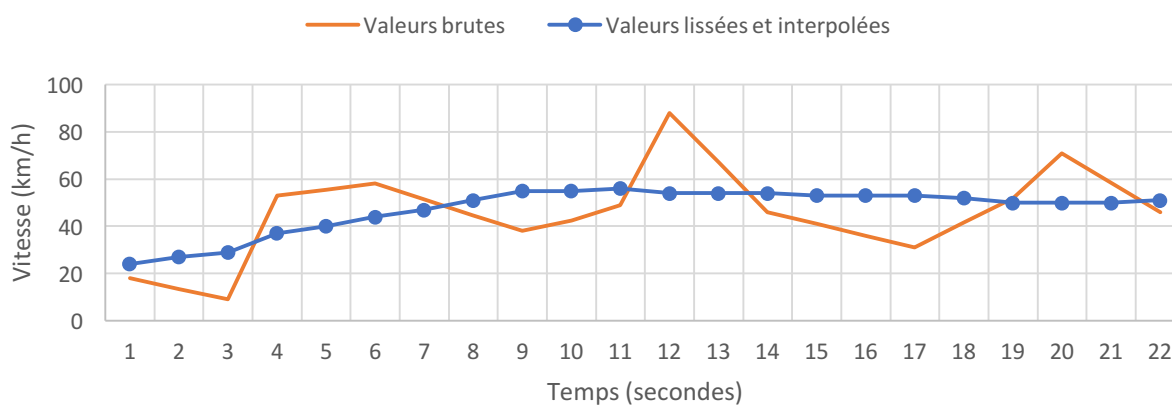


Figure 4-35 : Représentation des vitesses brutes et traitées d'une portion de course

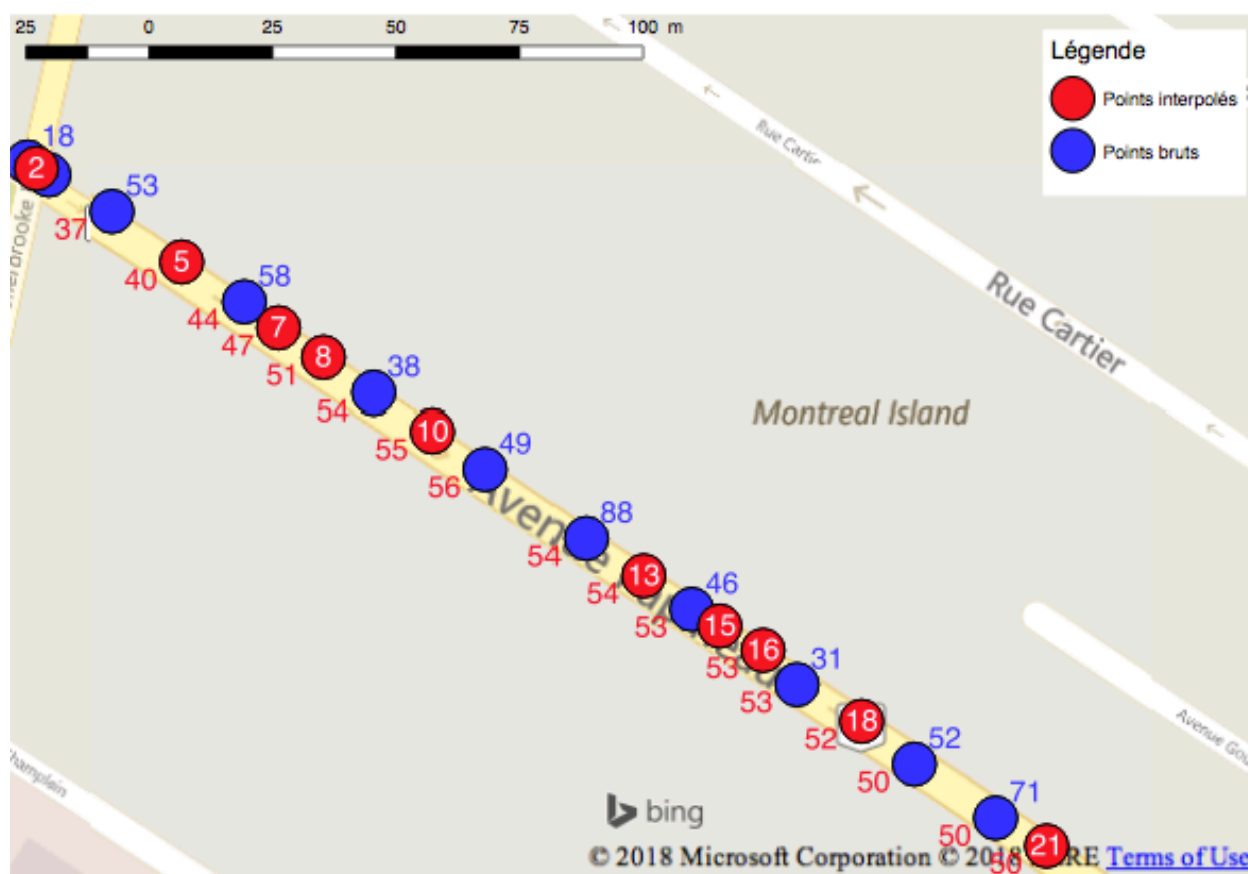


Figure 4-36 : Représentation sur QGIS d'une portion de la course 21

Sur la Figure 4-36, les valeurs en blanc dans les cercles rouges représentent le temps en secondes, les valeurs bleues représentent les valeurs de vitesses brutes et les valeurs en rouges représentent les valeurs de vitesses interpolées et lissées. La Figure 4-37 démontre la différence entre les consommations estimées à partir des données brutes de la portion de la course 21 et celles traitées.

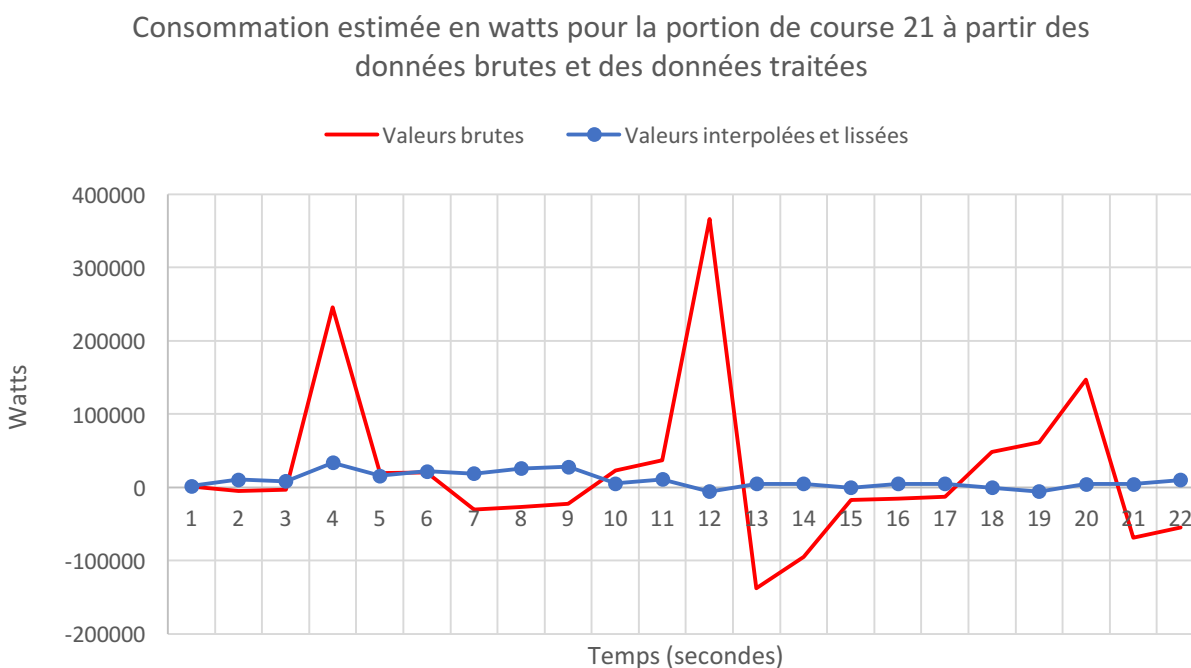


Figure 4-37 : Consommation estimée sur les valeurs brutes et traitées

La consommation énergétique totale estimée à partir des valeurs brutes de vitesses sur la portion de la course 21 est de 519 Wh/km, alors qu'elle est de 200 Wh/km sur les valeurs interpolées et lissées. Suite à ce résultat, la consommation énergétique de toutes les portions de courses qui ont été effectuées le dimanche sur rue résidentielle dans le secteur à l'étude a été estimée à partir des données de vitesses brutes. La moyenne de la consommation énergétique obtenue à partir des données brutes le dimanche sur rue résidentielle, toutes les heures confondues, est de 7 355 Wh/km, alors qu'elle est de 136 Wh/km à partir des données traitées. Le résultat obtenu à partir des données brutes est beaucoup trop élevé, ce qui confirme qu'un traitement de données est nécessaire.

CHAPITRE 5 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Ce dernier chapitre conclut sur ce projet de recherche dont les objectifs étaient multiples. Un rappel des principaux objectifs et de la méthodologie suivie pour atteindre ces objectifs est présenté, suivi d'une synthèse des résultats obtenus. Ensuite, les contributions de cette recherche au niveau de la compréhension de la consommation énergétique des véhicules électriques sont détaillées. La troisième section de ce chapitre porte sur l'énumération des limitations liées au projet de recherche et pour terminer, des perspectives de recherches sont proposées.

5.1 Synthèse

Ce projet de recherche est divisé en cinq chapitres, soit l'introduction, la revue de littérature, la méthodologie et les résultats pour terminer avec la conclusion qui est le présent chapitre. L'introduction a permis de mettre le lecteur en contexte face aux enjeux actuels au niveau du réchauffement planétaire et du rôle des transports dans les émissions de GES. Ces émissions peuvent maintenant diminuer grâce à l'émergence des véhicules électriques, mais la limite d'autonomie des véhicules électriques a tendance à freiner cette émergence. Une meilleure compréhension de la consommation énergétique des véhicules électriques est donc essentielle pour localiser les meilleurs endroits au sein d'une ville pour implanter des bornes de recharge et assurer un niveau de service adéquat aux propriétaires de véhicule électrique. De plus, l'analyse de la consommation énergétique des véhicules électriques permet de mieux comprendre les facteurs qui influencent l'efficacité énergétique, permettant ainsi de renseigner la clientèle concernée sur les meilleures habitudes de conduite à adopter. La problématique liée à l'étude de la consommation énergétique est ensuite présentée, suivie par les objectifs de ce projet de recherche.

La revue de littérature présente au lecteur les éléments importants liés au sujet de recherche et les recherches qui ont déjà été réalisées autour des thématiques suivantes: les émissions de GES au niveau mondial ainsi qu'à l'échelle du Québec, les véhicules électriques et leur émergence, les différents types de cycles de conduite et les étapes liées à leur développement, les facteurs qui influencent la consommation énergétique des véhicules électriques et certains modèles de consommation énergétique.

Le troisième chapitre, qui porte sur la méthodologie du projet, est le cœur de cette recherche. Il décrit les différentes bases de données utilisées et le traitement automatisé qui a été développé pour

faciliter la gestion de nombreuses données disponibles. Ensuite, les étapes suivies pour le développement des cycles de conduite ont été présentées ainsi que quelques exemples afin d'aider à la compréhension des différents sujets qui sont abordés. Certaines hypothèses ont aussi été posées, qui ont mené à une segmentation de la base de données des points GPS pour mieux comprendre l'impact des comportements de conduite sur la consommation énergétique des véhicules électriques à Montréal. Pour terminer, la méthode choisie pour l'estimation de la consommation énergétique des véhicules électriques est présentée avec les différents facteurs qui sont pris en compte.

Le dernier chapitre, avant de conclure sur le projet de recherche, porte sur la présentation des résultats suite à l'application de la méthodologie présentée au chapitre précédent. La première partie présente quelques cycles de conduite développés ainsi que les résultats engendrés par la segmentation des données sur les paramètres calculés. Ensuite, la consommation énergétique est calculée en fonction de la segmentation des données et c'est dans ce chapitre qu'une partie des hypothèses posées au chapitre précédent sont validées ou infirmées. À la toute fin, la comparaison entre les valeurs de consommation estimées et rapportées ainsi que la validation de la consommation énergétique estimée à partir des cycles de conduite sur des secteurs précis sont présentées. Ces derniers résultats ne sont pas très concluants puisqu'ils sont très différents des résultats espérés.

5.2 Contributions

La contribution principale de ce projet de recherche est au niveau du développement de plus de 200 cycles de conduite dans un contexte montréalais. Il a été mentionné à plusieurs reprises dans ce document que les cycles de conduite ne sont pas transférables d'une ville à une autre et ce projet de recherche expérimental vise à doter la région de Montréal d'un ensemble de cycles de conduite. L'étude des comportements de conduite amène une meilleure compréhension des enjeux liés à la consommation énergétique des véhicules électriques dans la ville. Les analyses effectuées dans le cadre de cette recherche vont permettre d'alimenter le développement d'un calculateur de chemin à consommation minimale et pourraient soutenir des analyses de positionnement stratégique de bornes de recharge.

La segmentation routière, journalière et horaire proposée dans ce projet de recherche est une première au niveau de l'étude des comportements de conduite et de la consommation énergétique

des véhicules électriques. De plus, l'accès aux données GPS des véhicules de Téo Taxi a permis de restreindre les principales limitations qui se retrouvent dans la majorité des études qui ont été publiées sur le sujet : le nombre limité de données GPS, de chauffeurs différents, véhicules électriques en fonction ainsi que du nombre de journées et d'heures à l'étude. Informer les chauffeurs de Téo Taxi sur les différences de comportements de conduite dans diverses situations et de leurs impacts sur la consommation énergétique pourrait influencer leurs choix d'itinéraires et ainsi optimiser la flotte en termes d'énergie.

5.3 Limitations

Il y a de nombreuses limitations liées à ce projet de recherche et celles-ci peuvent avoir des impacts sur les résultats obtenus. Tout d'abord, l'utilisation de données réelles permet de prévoir des valeurs plus réalistes de consommation énergétique puisqu'elles sont directement reliées aux comportements de conduite, mais ces données sont détachées de la dynamique du véhicule et du comportement du groupe motopropulseur. Des facteurs d'efficacité du moteur et des freins régénératifs ont été ajoutés lors du calcul de consommation énergétique, mais ces derniers sont théoriques et non réels. La comparaison entre l'estimation de la consommation énergétique et les données rapportées démontre qu'il peut y avoir imprécisions à ce niveau.

Il y a aussi des limitations au niveau de la précision des valeurs de vitesses et d'accélérations à partir des données GPS. C'est imprécisions sont majoritairement dues au niveau de précision des enregistrements GPS qui est à la seconde; il aurait été mieux de les avoir au dixième de seconde ou encore mieux, au centième de seconde. Il est probable que deux enregistrements consécutifs aient en vérité seulement 2 centièmes de seconde de différence, alors qu'elles sont enregistrées comme ayant 1 seconde de différence. Puisque la distance reste la même entre ces deux mêmes enregistrements, ce manque de précision a un impact sur le calcul de la vitesse et par le fait même, sur le calcul de l'accélération. Inversement, ce phénomène peut se produire lorsque deux enregistrements ont moins de 30 centièmes de seconde de différence; ils sont enregistrés comme étant effectués au même instant, ce qui est faux puisqu'il y a une distance qui a été parcourue. Ce manque de précision a assurément un impact sur les comportements de conduite représentés par les cycles de conduite.

Pour continuer, la méthode de lissage tend à diminuer les erreurs de vitesses engendrées par le manque de précision des enregistrements, mais ce lissage diminue ou supprime complètement les

temps d'arrêts. Puisque les deux valeurs qui précèdent et qui suivent la valeur à estimer ont un certain poids dans l'estimation, les temps d'arrêts sont raccourcis de quelques secondes et lorsque l'arrêt est de quatre secondes ou moins, l'arrêt est complètement supprimé. Les arrêts de quatre secondes ou moins sont très fréquents en milieu urbain dû à la fréquence des intersections et des droits de passage pour les piétons; il est donc primordial de garder ces temps d'arrêts. Pour remédier à la situation, les temps d'arrêts ont été gardés intacts, causant ainsi des sauts importants de vitesse et d'accélération à l'arrivée d'un temps d'arrêt et lorsque ce dernier se termine. Or, puisqu'ils sont similaires de part et d'autre du temps d'arrêt, l'impact sur l'estimation de la consommation énergétique est diminué (une forte décélération suivie d'une forte accélération tend à équilibrer les imprécisions).

Au niveau de la sélection des données GPS lors de la segmentation routière, il y a aussi une limitation. La sélection s'est effectuée au niveau de la présence d'un type de segment dans les données comprises au sein d'un même micro-segments. Ensuite, les courses qui détenaient le plus de micro-segments ayant des enregistrements sur un même type de segment routier ont été retenues, ce qui assure un déplacement continu sur un même type de segment routier. Cependant, il n'est pas assuré que les enregistrements au début du premier micro-segment et à la fin du dernier micro-segment qui composent les courses sont effectivement sur le type de segment routier déterminé. Ils ont donc été considérés comme étant tous sur le segment désiré, alors que les premiers et derniers peuvent être sur un autre type de segment routier. Une limitation semblable se retrouve au niveau de la segmentation horaire effectuée. Chacune des courses a été répertoriée en fonction de l'heure de départ de la course, mais elles peuvent très bien se terminer dans l'heure suivante. Il y a donc probablement des données utilisées pour un intervalle de temps précis qui devraient se retrouver dans l'intervalle suivant. Ces limitations ont possiblement un impact sur les cycles de conduite développés.

Ensuite, il y a de multiples limitations au niveau de l'estimation de la consommation énergétique des véhicules électriques à partir des cycles de conduite. La segmentation routière, journalière et horaire permet de comparer les différences de consommation énergétique en fonction du type de segment routier emprunté et du moment lors duquel le déplacement est effectué. Cependant, cette segmentation ne prend pas en considération l'élévation de la route, qui est un paramètre important dans l'estimation de la consommation énergétique des véhicules électriques. Les données de

consommation moyennes obtenues à partir des cycles de conduite développés sont donc très faibles par rapport à ce que l'on peut observer dans la réalité.

De plus, il y a une limitation au niveau de la valeur de la masse du véhicule utilisée lors de l'estimation de la consommation énergétique. Le panneau installé sur le toit du taxi a un poids non négligeable, le poids du chauffeur ainsi que le nombre de passagers et leurs effets personnels engendrent un poids supplémentaire qui est totalement inconnu. Il a été démontré lors de la comparaison des données estimées de consommation versus celles rapportées qu'une sous-évaluation d'une masse peut influencer grandement les résultats.

Finalement, il y a des limitations au niveau de tous les paramètres qui peuvent influencer la consommation énergétique d'un véhicule électrique. Que ce soit par rapport à l'environnement naturel ou artificiel, à la technologie du véhicule, au conducteur, au type de déplacement ou aux techniques utilisées pour recueillir les données. Ce sont tous des facteurs qui peuvent altérer les résultats.

5.4 Perspectives de recherche

La dernière section de ce mémoire porte sur les perspectives de recherche. Les travaux présentés dans ce document sont les premiers qui portent sur les comportements de conduite et la consommation énergétique des véhicules électriques dans le contexte montréalais. Les perspectives de recherche sont donc nombreuses.

Pour commencer, il serait important de développer des cycles de conduite qui représentent les comportements de conduite du samedi, du mardi et du jeudi et des 24 heures de la journée. Il risque aussi d'y avoir des différences au niveau du comportement de conduite lors des jours fériés, des événements spéciaux, des journées de tempête de neige, etc. Peut-être qu'ils ressembleraient à certains des résultats obtenus suite à la segmentation journalière et horaire, mais peut-être qu'ils formeraient un nouveau type de comportement de conduite.

L'élaboration d'une segmentation routière plus détaillée des données GPS provenant des véhicules de Téo Taxi aurait pour incidence de raffiner les résultats. Il serait possible de segmenter les données en fonction de tous les types de route existants à Montréal (limites de vitesse de 60 km/h et 70 km/h, voies de service, bretelles d'accès, ponts, etc.) si la localisation des point GPS sur le réseau routier montréalais (*map matching*) était plus précise. Ces analyses permettraient de

reproduire des déplacements complets au sein de la ville. Il pourrait être intéressant aussi de diviser les données en fonction de leur emplacement dans la ville : au centre-ville, en périphérie du centre-ville et des secteurs beaucoup plus éloignés. La présence de piétons, de pistes cyclables et voies réservées aux autobus et aux taxis ont certainement un impact sur le comportement de conduite. De plus, les comportements de conduite en hiver sont certainement différents de ceux en été et si les données rapportées de consommation énergétique des véhicules électriques pouvaient être plus précises, il serait intéressant d'analyser la différence de consommation en fonction de la température extérieure.

Il serait pertinent d'analyser s'il y a des différences majeures entre les comportements de conduite de la population et ceux des chauffeurs de taxi. En plus d'avoir accès aux voies réservées pour autobus et taxis qui diminuent la densité du trafic sur la voie empruntée, les chauffeurs de taxis sont très habitués de conduire en milieu urbain, ce qui n'est pas nécessairement représentatif de la population. Il y a probablement un biais au niveau des comportements de conduite représentés par les cycles de conduite à ce niveau-là.

Au niveau de l'estimation de la consommation énergétique, il faudrait inclure l'élévation de la route pour obtenir des résultats plus réalistes. Il pourrait être possible de répertorier différentes amplitudes de pentes et segmenter les données en fonction de ce paramètre. Peut-être que certains itinéraires seraient à proscrire pour les détenteurs de véhicules électriques.

Pour terminer, les études effectuées et celles qui suivront dans l'avenir sur la consommation énergétique des véhicules électriques pourraient permettre de développer un calculateur de chemin à consommation minimale pour les véhicules électriques à Montréal. Ce calculateur de chemin serait utile pour tous ceux qui utilisent un véhicule électrique, un peu comme de nombreuses applications le font pour proposer aux conducteurs les chemins les plus courts en termes de temps et de distance pour une paire origine-destination prédéfinie. Ce calculateur pourrait, en plus d'offrir des options d'itinéraires les plus courts, estimer la consommation énergétique reliée aux itinéraires proposés permettant ainsi aux utilisateurs de mieux évaluer l'énergie requise pour effectuer un certain déplacement et réduire l'anxiété que certaines personnes peuvent avoir face à l'autonomie de la batterie des véhicules électriques.

BIBLIOGRAPHIE

- André, M., Joumard, R., Vidon, R., Tassel, P., & Perret, P. (2006). Real-world European driving cycles, for measuring pollutant emissions from high- and low-powered cars. *Atmospheric Environment*, 40(31), 5944-5953. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.12.057>
- Apostolaki-Iosifidou, E., Codani, P., & Kempton, W. (2017). Measurement of power loss during electric vehicle charging and discharging. *Energy*, 127, 730-742.
- Ashtari, A., Bibeau, E., & Shahidinejad, S. (2012). Using large driving record samples and a stochastic approach for real-world driving cycle construction: Winnipeg driving cycle. *Transportation science*, 48(2), 170-183.
- Association des Véhicules Électriques du Québec. (2018). Actualités. Tiré de www.aveq.ca
- Automobile Propre. (2016). Taux de pénétration par pays. Tiré de <http://www.automobile-propre.com/wp-content/uploads/2016/08/vehicules-electriques-taux-penetration-europe.jpg>
- Badin, F., Le Berr, F., Briki, H., Dabadie, J., Petit, M., Magand, S., & Condemine, E. (2013). *Evaluation of EVs energy consumption influencing factors, driving conditions, auxiliaries use, driver's aggressiveness*. Communication présentée à Electric Vehicle Symposium and Exhibition (EVS27), 2013 World (p. 1-12).
- Baum, M., Dibbelt, J., Pajor, T., & Wagner, D. (2013). *Energy-optimal routes for electric vehicles*. Communication présentée à Proceedings of the 21st ACM SIGSPATIAL international conference on advances in geographic information systems (p. 54-63).
- Berzi, L., Delogu, M., & Pierini, M. (2016). Development of driving cycles for electric vehicles in the context of the city of Florence. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 47, 299-322.
- Brady, J., & O'Mahony, M. (2016). Development of a driving cycle to evaluate the energy economy of electric vehicles in urban areas. *Applied energy*, 177, 165-178. Tiré de <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.05.094>
- Braun, A., & Rid, W. (2017). The influence of driving patterns on energy consumption in electric car driving and the role of regenerative braking. *Transportation research procedia*, 22, 174-182.
- Chiu, C.-C., Tsai, N.-C., & Lin, C.-C. (2014). Near-optimal order-reduced control for A/C (air-conditioning) system of EVs (electric vehicles). *Energy*, 66, 342-353.
- CIRAIG. (2016). *Analyse de cycle de vie comparative des impacts environnementaux aux potentiels du véhicule conventionnel et véhicule électrique dans un contexte d'utilisation québécois*. Tiré de <http://www.hydroquebec.com/data/developpement-durable/pdf/analyse-comparaison-vehicule-electrique-vehicule-conventionnel.pdf>

- Climats et voyages. (2018). Climat - Danemark. Tiré de <http://www.climatsetvoyages.com/climat/danemark>
- CNEWS. (2017). L'Inde va interdire les voitures diesel et essence. Tiré de <http://www.cnews.fr/monde/2017-05-24/linde-va-interdire-les-voitures-diesel-et-essence-756128>
- De Cauwer, C., Van Mierlo, J., & Coosemans, T. (2015). Energy consumption prediction for electric vehicles based on real-world data. *Energies*, 8(8), 8573-8593.
- Eisele, A., Horlbeck, L., Hann, M., Jäger, B., & Lienkamp, M. (2016). *Real-life data based analysis of driving cycles regarding their insufficient cycle duration*. Communication présentée à Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2016 IEEE 19th International Conference on (p. 408-415).
- Energiguide. (2018). Le watt et le kilowattheure, c'est quoi? Tiré de <https://www.energuide.be/fr/questions-reponses/le-watt-et-le-kilowattheure-cest-quoi/121/>
- Engineering ToolBox. (2008). Rolling Resistance. Tiré de https://www.engineeringtoolbox.com/rolling-friction-resistance-d_1303.html
- Esteves-Booth, A., Muneer, T., Kirby, H., Kubie, J., & Hunter, J. (2001). The measurement of vehicular driving cycle within the city of Edinburgh. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 6(3), 209-220.
- Fetene, G. M., Kaplan, S., Mabit, S. L., Jensen, A. F., & Prato, C. G. (2017). Harnessing big data for estimating the energy consumption and driving range of electric vehicles. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 54, 1-11.
- Fiori, C., Ahn, K., & Rakha, H. A. (2016). Power-based electric vehicle energy consumption model: Model development and validation. *Applied Energy*, 168, 257-268.
- Galvin, R. (2017). Energy consumption effects of speed and acceleration in electric vehicles: Laboratory case studies and implications for drivers and policymakers. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 53, 234-248.
- Gauchia, A., Jafari, M., Zhang, K., & Gauchia, L. (2015). *REV-cycle: A MATLAB-based tool for large-data analysis of real-life driving cycles for electric vehicles*. Communication présentée à Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC), 2015 IEEE (p. 1-5).
- Genikomsakis, K. N., & Mitrentsis, G. (2017). A computationally efficient simulation model for estimating energy consumption of electric vehicles in the context of route planning applications. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 50, 98-118.

- Gouvernement du Canada. (2018). *Rapport de consommation de carburant*. Tiré de http://oee.nrcan.gc.ca/fcr-rcf/public/report-f.cfm?reportID=23100&submitted=true&sort=overall_rank&searchbox=&year=2018&class=T&make=all&model=all&trans=all&FT=all&cylinders=all&unit=0&kmPerYear=&cityRating=&fuelGas=&fuelPremium=&fuelDiesel=&onSearchLink=%231&pageSize=10&btnSearch=Search
- Gouvernement du Québec. (2015). *Propulser le Québec par l'électricité; Plan d'action en électrification des transports 2015-2020*. Tiré de <https://transportselectriques.gouv.qc.ca/wp-content/uploads/CIAO-050-LG2-MTQ-Rapport2016FRv2.1.pdf>
- Gouvernement du Québec. (2018). Les gaz à effet de serre. Tiré de <http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/air/questce-ges.htm>
- Guide de l'auto. (2018a). Kia. Tiré de <https://www.guideautoweb.com/constructeurs/kia/soul/2015/>
- Guide de l'auto. (2018b). Nissan Leaf. Tiré de <https://www.guideautoweb.com/constructeurs/nissan/leaf/2016/>
- Guide de l'auto. (2018c). Tesla. Tiré de <https://www.guideautoweb.com/constructeurs/tesla/models/2016/specifications/70d/>
- Hellinga, B., & Chan, T. N. (2002). ISSUES RELATED TO QUANTIFYING THE ENVIRONMENTAL IMPACTS OF TRANSPORTATION STRATEGIES USING GPS DATA.
- Hung, W., Tong, H., Lee, C., Ha, K., & Pao, L. (2007). Development of a practical driving cycle construction methodology: A case study in Hong Kong. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 12(2), 115-128.
- Hydro-Québec. (2018). Notre énergie est propre et renouvelable. Tiré de <http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/changements/ges/2015/Inventaire1990-2015.pdf>
- International Energy Agency. (2017). *CO2 emissions from fuel combustion : Overview*. Tiré de <https://www.livescience.com/topics/global-warming>
- Kamble, S. H., Mathew, T. V., & Sharma, G. (2009). Development of real-world driving cycle: Case study of Pune, India. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 14(2), 132-140.
- Lelièvre, A. (2018). Voiture électrique : l'exception norvégienne. *Les Echos*. Tiré de https://www.lesechos.fr/04/01/2018/lesechos.fr/0301101570748_voiture-electrique---l-exception-norvegienne.htm

- Li, W., Stanula, P., Egede, P., Kara, S., & Herrmann, C. (2016). Determining the main factors influencing the energy consumption of electric vehicles in the usage phase. *Procedia CIRP*, 48, 352-357.
- Liu, K., Wang, J., Yamamoto, T., & Morikawa, T. (2016). Modelling the multilevel structure and mixed effects of the factors influencing the energy consumption of electric vehicles. *Applied energy*, 183, 1351-1360.
- Liu, K., Yamamoto, T., & Morikawa, T. (2017). Impact of road gradient on energy consumption of electric vehicles. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 54, 74-81.
- Live Science. (2018). Global Warming: News, Facts, Causes & Effects. Tiré de <https://www.livescience.com/topics/global-warming>
- Lv, C., Zhang, J., Li, Y., & Yuan, Y. (2015). Mechanism analysis and evaluation methodology of regenerative braking contribution to energy efficiency improvement of electrified vehicles. *Energy Conversion and Management*, 92, 469-482.
- NASA. (2017). Global Climate Change. Tiré de <https://climate.nasa.gov/>
- Nouri, P. (2016). *Enhancing the gasoline vehicles' CO 2 emissions estimation in Montreal*. (Ecole Polytechnique, Montreal (Canada)).
- Nouri, P., & Morency, C. (2017). Evaluating Microtrip Definitions for Developing Driving Cycles. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*(2627), 86-92.
- Nyberg, P., Frisk, E., & Nielsen, L. (2016). Using real-world driving databases to generate driving cycles with equivalence properties. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 65(6), 4095-4105.
- Park, H.-S., & Jun, C.-H. (2009). A simple and fast algorithm for K-medoids clustering. *Expert systems with applications*, 36(2), 3336-3341.
- Pfriem, M., & Gauterin, F. (2016). Development of real-world Driving Cycles for Battery Electric Vehicles.
- Rakha, H., Dion, F., & Sin, H.-G. (2001). Using global positioning system data for field evaluation of energy and emission impact of traffic flow improvement projects: Issues and proposed solutions. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*(1768), 210-223.
- Rakha, H. A., Ahn, K., Moran, K., Saerens, B., & Van den Bulck, E. (2011). Virginia tech comprehensive power-based fuel consumption model: model development and testing. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 16(7), 492-503.

- Tanaka, D., Ashida, T., & Minami, S. (2008). *An analytical method of EV velocity profile determination from the power consumption of electric vehicles*. Communication présentée à Vehicle Power and Propulsion Conference, 2008. VPPC'08. IEEE (p. 1-3).
- Tewiele, S., Driesch, P., Weber, T., & Schramm, D. (2018). *Clustering of real BEV driving data with subsequent driving cycle construction using Markov chains*. Communication présentée à AmE 2018-Automotive meets Electronics; 9th GMM-Symposium.
- Travesset-Baro, O., Rosas-Casals, M., & Jover, E. (2015). Transport energy consumption in mountainous roads. A comparative case study for internal combustion engines and electric vehicles in Andorra. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 34, 16-26.
- Tzirakis, E., Pitsas, K., Zannikos, F., & Stournas, S. (2006). Vehicle emissions and driving cycles: comparison of the Athens driving cycle (ADC) with ECE-15 and European driving cycle (EDC). *Global NEST Journal*, 8(3), 282-290.
- Ville de Montréal. (2018). Température moyenne. Tiré de http://ville.montreal.qc.ca/portal/page?_pageid=6897,67875636&_dad=portal&_schema=PORTAL
- Wu, X., Freese, D., Cabrera, A., & Kitch, W. A. (2015). Electric vehicles' energy consumption measurement and estimation. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 34, 52-67.
- Wu, X., He, X., Yu, G., Harmandayan, A., & Wang, Y. (2015). Energy-optimal speed control for electric vehicles on signalized arterials. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 16(5), 2786-2796.
- Zhang, R., & Yao, E. (2015). Electric vehicles' energy consumption estimation with real driving condition data. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 41, 177-187.

ANNEXE A – ALGORITHME : CHOIX DES COURSES POUR LE DÉVELOPPEMENT DES CYCLES DE CONDUITE

Tableau A - 1 : Courses retenues pour le développement des cycles de conduite le lundi sur rue résidentielle

Heure	Nombre de points GPS bruts	Nombre de courses	Supprimer toutes les courses qui ont un nombre de micro-segments inférieur à :	Nombre de courses au final	Nombre de points GPS interpolés et lissés
5h00	838	65	3	12	2260
6h00	978	100	5	12	2464
7h00	4177	242	5	28	8470
8h00	6950	373	5	32	12003
9h00	6310	375	5	27	12357
10h00	4498	296	5	23	9652
11h00	5389	305	5	29	8083
12h00	5467	300	5	33	10393
13h00	5444	305	5	19	6684
14h00	5899	273	5	46	16616
15h00	5139	276	5	25	1324
16h00	6169	321	5	32	10391
17h00	7863	394	5	40	16567
18h00	6927	39	5	39	11526
19h00	5814	329	5	37	11830
20h00	4302	252	5	27	8040
Minuit	1744	112	3	27	5569

Tableau A - 2 : Courses retenues pour le développement des cycles de conduite le mercredi sur rue résidentielle

Heure	Nombre de points GPS bruts	Nombre de courses	Supprimer toutes les courses qui ont un nombre de micro-segments inférieur à :	Nombre de courses au final	Nombre de points GPS interpolés et lissés
5h00	1090	71	5	10	2876
6h00	960	98	5	10	2437
7h00	4975	322	5	26	7356
8h00	8239	542	5	42	14651
9h00	8680	479	5	40	16491
10h00	7081	408	5	37	13936
11h00	7168	400	5	31	10083
12h00	8342	444	5	47	18978
13h00	8296	412	5	39	13355
14h00	8039	434	5	36	14233
15h00	7504	364	5	34	13747
16h00	10186	411	5	54	23517
17h00	13613	618	5	72	30287
18h00	14837	746	5	81	31753
19h00	11634	642	5	69	23886
20h00	7178	469	5	33	9997
Minuit	4505	230	5	29	8400

Tableau A - 3 : Courses retenues pour le développement des cycles de conduite le vendredi sur
rue résidentielle

Heure	Nombre de points GPS bruts	Nombre de courses	Supprimer toutes les courses qui ont un nombre de micro-segments inférieur à :	Nombre de courses au final	Nombre de points GPS interpolés et lissés
5h00	1177	91	5	6	2087
6h00	1287	99	5	8	2202
7h00	5233	347	5	33	10549
8h00	7681	471	5	39	13892
9h00	8661	505	5	48	16607
10h00	5519	363	5	33	11489
11h00	7390	378	5	40	14514
12h00	8030	406	5	42	18821
13h00	7461	351	5	43	15271
14h00	7947	392	5	42	13885
15h00	8176	336	5	42	20124
16h00	9243	381	5	46	17235
17h00	13379	531	5	61	29709
18h00	14488	696	5	76	26827
19h00	14711	757	5	73	26461
20h00	11449	619	5	60	21667
Minuit	8373	426	5	57	19579

Tableau A - 4 : Courses retenues pour le développement des cycles de conduite le dimanche sur
rue résidentielle

Heure	Nombre de points GPS bruts	Nombre de courses	Supprimer toutes les courses qui ont un nombre de micro-segments inférieur à :	Nombre de courses au final	Nombre de points GPS interpolés et lissés
5h00	1384	66	5	10	3039
6h00	579	39	5	5	963
7h00	775	43	5	7	4275
8h00	674	81	5	2	546
9h00	1275	129	5	8	2018
10h00	2169	119	5	12	4360
11h00	3887	181	5	23	7973
12h00	3404	198	5	14	5848
13h00	3114	170	5	16	5023
14h00	4123	197	5	22	11045
15h00	4146	188	5	20	12853
16h00	5164	245	5	32	10622
17h00	5718	251	5	32	12217
18h00	4623	259	5	29	9382
19h00	3630	221	5	19	4755
20h00	4096	233	5	23	7850
Minuit	12260	304	7	33	14007

Tableau A - 5 : Courses retenues pour le développement des cycles de conduite le lundi sur
artère principale

Heure	Nombre de points GPS bruts	Nombre de courses	Supprimer toutes les courses qui ont un nombre de micro-segments inférieur à :	Nombre de courses au final	Nombre de points GPS interpolés et lissés
5h00	2846	88	5	22	2379
6h00	3279	121	5	22	2168
7h00	8457	293	5	48	5884
8h00	15913	458	5	64	29563
9h00	13806	441	5	68	27958
10h00	11264	329	5	57	24626
11h00	10097	300	5	54	19434
12h00	12342	309	5	66	26410
13h00	8380	287	5	46	16817
14h00	9669	285	5	52	21789
15h00	9355	292	5	49	19163
16h00	12651	304	5	58	28707
17h00	13922	408	5	8	28493
18h00	18529	450	5	109	39943
19h00	13510	351	5	86	26079
20h00	10901	249	5	75	32234
Minuit	4072	103	5	28	8507

Tableau A - 6 : Courses retenues pour le développement des cycles de conduite le mercredi sur
artère principale

Heure	Nombre de points GPS bruts	Nombre de courses	Supprimer toutes les courses qui ont un nombre de micro-segments inférieur à :	Nombre de courses au final	Nombre de points GPS interpolés et lissés
5h00	2604	94	5	24	5263
6h00	3945	133	5	23	8091
7h00	12529	403	5	61	23280
8h00	20886	589	5	103	44759
9h00	19280	566	5	96	40599
10h00	16102	498	5	77	30995
11h00	17432	468	5	92	36002
12h00	13794	440	5	73	28326
13h00	16493	432	5	79	33669
14h00	13107	403	5	59	25464
15h00	13677	376	5	65	31378
16h00	15020	436	5	67	31378
17h00	23049	557	5	100	49436
18h00	30917	760	5	151	63094
19h00	26740	682	5	148	60255
20h00	22720	488	5	143	49222
Minuit	7767	195	5	61	19249

Tableau A - 7 : Courses retenues pour le développement des cycles de conduite le vendredi sur
artère principale

Heure	Nombre de points GPS bruts	Nombre de courses	Supprimer toutes les courses qui ont un nombre de micro-segments inférieur à :	Nombre de courses au final	Nombre de points GPS interpolés et lissés
5h00	3967	99	5	25	9880
6h00	3893	134	5	26	7822
7h00	13925	427	5	71	27537
8h00	21354	566	5	97	44095
9h00	19392	536	5	101	39844
10h00	12910	391	5	67	28252
11h00	14509	401	5	85	31893
12h00	14784	446	5	76	31493
13h00	10340	321	5	61	22146
14h00	10623	355	5	48	19475
15h00	11175	331	5	52	21856
16h00	13390	358	5	62	30795
17h00	18959	503	5	94	37594
18h00	24484	639	5	136	50449
19h00	25357	677	5	140	56420
20h00	21058	556	5	127	46703
Minuit	13279	379	5	96	28046

Tableau A - 8 : Courses retenues pour le développement des cycles de conduite le dimanche sur
artère principale

Heure	Nombre de points GPS bruts	Nombre de courses	Supprimer toutes les courses qui ont un nombre de micro-segments inférieur à :	Nombre de courses au final	Nombre de points GPS interpolés et lissés
5h00	2786	72	5	18	5634
6h00	944	43	5	6	2493
7h00	2334	66	5	16	3089
8h00	3829	84	5	30	9093
9h00	3065	94	5	23	6245
10h00	3580	131	5	23	7119
11h00	5675	145	5	31	10316
12h00	7613	181	5	45	18651
13h00	7654	187	5	45	17522
14h00	7824	211	5	43	15716
15h00	8539	174	5	41	20302
16h00	9821	226	5	6	24703
17h00	11882	257	5	60	26214
18h00	10218	271	5	52	18800
19h00	8842	230	5	53	17957
20h00	7042	187	5	45	15461
Minuit	20374	540	5	112	45346

Tableau A - 9 : Courses retenues pour le développement des cycles de conduite le lundi sur
autoroute

Heure	Nombre de points GPS bruts	Nombre de courses	Supprimer toutes les courses qui ont un nombre de micro-segments inférieur à :	Nombre de courses au final	Nombre de points GPS interpolés et lissés
5h00	31390	265	35	100	63518
6h00	38503	327	55	37	30534
7h00	32743	370	55	35	31739
8h00	31284	425	55	27	29222
9h00	29976	465	55	30	31237
10h00	24127	339	50	39	30554
11h00	25985	388	55	36	28961
12h00	25027	392	50	38	27293
13h00	28533	435	55	36	30089
14h00	41437	446	57	35	32304
15h00	54996	458	57	32	37294
16h00	50325	466	57	34	38839
17h00	55018	528	57	39	47947
18h00	49348	514	60	42	39971
19h00	31012	386	57	38	30690
20h00	19860	308	50	29	21655
Minuit	4868	92	5	42	17472

Tableau A - 10 : Courses retenues pour le développement des cycles de conduite le mercredi sur
autoroute

Heure	Nombre de points GPS bruts	Nombre de courses	Supprimer toutes les courses qui ont un nombre de micro-segments inférieur à :	Nombre de courses au final	Nombre de points GPS interpolés et lissés
5h00	31376	273	55	39	27521
6h00	32874	295	55	32	25709
7h00	34287	443	52	38	31003
8h00	38374	560	52	30	37202
9h00	25367	593	50	31	25796
10h00	22643	470	45	45	31795
11h00	27228	522	52	38	28963
12h00	32932	534	55	37	29479
13h00	38148	369	57	35	34784
14h00	46288	593	57	33	35039
15h00	66349	591	57	34	44701
16h00	78056	634	57	39	54314
17h00	77419	671	58	38	52809
18h00	71120	869	59	36	40068
19h00	46676	724	59	36	31226
20h00	30396	526	55	36	31019
Minuit	10581	187	20	38	25450

Tableau A - 11 : Courses retenues pour le développement des cycles de conduite le vendredi sur
autoroute

Heure	Nombre de points GPS bruts	Nombre de courses	Supprimer toutes les courses qui ont un nombre de micro-segments inférieur à :	Nombre de courses au final	Nombre de points GPS interpolés et lissés
5h00	20685	206	50	37	23907
6h00	23957	253	50	34	23912
7h00	23218	381	50	28	23184
8h00	32369	520	45	32	31180
9h00	24871	541	49	35	31919
10h00	24237	426	45	36	30279
11h00	29010	502	55	36	32185
12h00	38752	525	57	30	29550
13h00	39244	477	56	37	38257
14h00	51760	560	56	35	38389
15h00	58220	550	55	36	49058
16h00	66826	566	57	36	46580
17h00	70131	671	57	38	43457
18h00	63832	798	57	37	43666
19h00	53924	723	60	35	33070
20h00	35191	590	57	37	31713
Minuit	16351	363	35	30	22798

Tableau A - 12 : Courses retenues pour le développement des cycles de conduite le dimanche sur
autoroute

Heure	Nombre de points GPS bruts	Nombre de courses	Supprimer toutes les courses qui ont un nombre de micro-segments inférieur à :	Nombre de courses au final	Nombre de points GPS interpolés et lissés
5h00	14501	146	45	31	19371
6h00	12681	113	40	35	22973
7h00	8504	91	25	36	19099
8h00	7441	105	25	30	15662
9h00	9826	119	13	37	22072
10h00	9973	154	35	27	18726
11h00	12662	169	35	33	23346
12h00	17483	203	45	35	28831
13h00	24012	244	50	38	28732
14h00	27797	300	55	31	23576
15h00	37335	335	55	38	33690
16h00	50999	432	57	30	28437
17h00	52484	452	60	36	34151
18h00	41812	420	58	32	26745
19h00	31612	326	57	36	30806
20h00	19316	243	45	39	29141
Minuit	19006	469	40	24	19600

ANNEXE B – PARAMÈTRES CALCULÉS POUR LES CYCLES DE CONDUITE

Tableau B - 1 : Paramètres calculés pour les cycles de conduite le lundi sur rue résidentielle

	Wh/km	AveSpeed	AveRunSpeed	Aveacc	AveDCC	Noacc	RMSquareacc	power	Tidle	Tacc	Tcruise	Tdcc	Tcreep
5h	153,5	26,3	33,5	0,6	-0,6	21	1,0	8,0	21%	35%	8%	30%	5%
6h	130,9	22,6	26,7	0,4	-0,5	23	0,5	5,4	15%	35%	11%	31%	8%
7h	145,8	21,4	25,6	0,5	-0,6	38	0,9	5,2	16%	34%	8%	31%	10%
8h	148,3	16,4	20,3	0,4	-0,5	40	0,5	3,7	19%	30%	7%	26%	18%
9h	147,7	18,9	23,7	0,5	-0,5	50	0,6	4,6	20%	34%	7%	29%	10%
10h	157,5	19,5	24,3	0,5	-0,5	44	0,7	4,8	20%	33%	7%	29%	11%
11h	141,5	20,9	25,7	0,5	-0,5	29	0,6	5,1	19%	33%	8%	30%	10%
12h	135,9	22,9	26,8	0,5	-0,6	37	0,8	5,7	15%	36%	9%	31%	9%
13h	134,1	20,5	25,2	0,5	-0,6	40	0,6	4,9	19%	34%	8%	29%	11%
14h	142,9	19,6	24,5	0,5	-0,5	40	0,7	4,9	20%	33%	7%	29%	11%
15h	151,9	17,9	23,2	0,4	-0,5	44	0,6	4,4	23%	32%	7%	25%	13%
16h	134,9	20,6	25,4	0,5	-0,6	37	0,6	4,8	19%	34%	9%	30%	9%
17h	156,8	18,8	23,0	0,4	-0,5	46	0,5	4,3	18%	34%	8%	28%	11%
18h	134,8	22,9	27,8	0,5	-0,5	32	0,6	5,4	17%	36%	10%	31%	6%
19h	151,5	21,1	25,8	0,5	-0,5	33	0,7	5,2	18%	34%	8%	30%	10%
20h	147,9	22,9	27,3	0,5	-0,5	37	0,6	5,7	16%	35%	8%	31%	9%
minuit	135,5	24,5	28,3	0,5	-0,5	22	0,5	5,9	13%	37%	11%	31%	8%

Tableau B - 2 : Paramètres calculés pour les cycles de conduite le mercredi sur rue résidentielle

	Wh/km	AveSpeed	AveRunSpeed	Aveacc	AveDCC	Noacc	RMSquareacc	power	Tidle	Tacc	Tcruise	Tdcc	Tcreep
5h	150,1	25,1	30,7	0,7	-0,6	36	1,4	7,2	18%	35%	8%	33%	6%
6h	141,7	15,2	26,9	0,5	-0,6	19	0,4	3,7	43%	23%	6%	21%	6%
7h	129,3	23,0	27,2	0,5	-0,6	34	0,6	5,4	16%	37%	9%	32%	7%
8h	151,8	18,3	23,3	0,5	-0,5	37	0,6	4,4	21%	31%	7%	28%	12%
9h	145,4	19,9	24,9	0,5	-0,6	43	0,7	5,0	20%	33%	7%	28%	11%
10h	143,1	17,6	23,8	0,5	-0,6	43	0,7	4,4	26%	32%	7%	25%	10%
11h	150,4	22,0	27,0	0,6	-0,6	38	0,9	5,5	18%	36%	8%	31%	7%
12h	148,1	21,2	25,7	0,5	-0,6	46	0,7	5,3	18%	35%	8%	30%	10%
13h	152,5	20,9	25,4	0,5	-0,6	39	0,7	5,4	18%	36%	7%	29%	10%
14h	157,1	17,9	22,2	0,5	-0,6	43	0,7	4,3	20%	33%	6%	27%	14%
15h	160,1	18,8	23,7	0,5	-0,5	43	0,5	4,5	21%	33%	7%	28%	12%
16h	158,1	18,0	23,7	0,5	-0,5	49	0,6	4,4	24%	31%	7%	26%	11%
17h	132,0	17,6	22,6	0,4	-0,5	45	0,6	4,2	22%	32%	7%	27%	13%
18h	157,6	18,7	23,1	0,5	-0,5	42	0,6	4,4	19%	33%	7%	28%	13%
19h	152,0	18,8	25,1	0,5	-0,6	35	0,5	4,6	25%	33%	7%	27%	9%
20h	144,6	18,8	25,1	0,5	-0,6	34	0,5	4,6	25%	33%	7%	27%	9%
minuit	134,5	21,5	26,6	0,5	-0,5	31	0,7	5,1	19%	33%	10%	28%	9%

Tableau B - 3 : Paramètres calculés pour les cycles de conduite le vendredi sur rue résidentielle

	Wh/km	AveSpeed	AveRunSpeed	Aveacc	AveDCC	Noacc	RMSquareacc	power	Tidle	Tacc	Tcruise	Tdcc	Tcreep
5h	134,4	25,8	32,7	0,6	-0,7	42	1,1	7,1	21%	33%	10%	32%	4%
6h	137,8	25,7	30,4	0,6	-0,6	33	0,8	6,41	15%	36%	9%	34%	6%
7h	139,9	22,8	26,8	0,5	-0,5	36	0,6	5,46	15%	36%	8%	33%	9%
8h	136,4	21,3	26,2	0,5	-0,6	39	0,6	5,04	19%	35%	8%	30%	9%
9h	157,9	19,7	25,2	0,5	-0,6	39	0,7	4,88	22%	34%	8%	28%	9%
10h	145,1	20,4	25,5	0,5	-0,6	39	0,7	5,14	20%	35%	7%	29%	9%
11h	155,8	21,7	26,1	0,5	-0,6	40	0,7	5,42	17%	35%	8%	30%	9%
12h	141,9	18,8	23,6	0,5	-0,5	48	0,6	4,59	20%	33%	7%	28%	13%
13h	158,0	20,1	25,2	0,5	-0,6	38	0,7	5,08	20%	33%	7%	29%	10%
14h	148,7	20,9	25,7	0,5	-0,6	36	0,6	5,11	19%	36%	8%	29%	9%
15h	152,9	16,9	22,0	0,4	-0,5	47	0,5	4,06	23%	32%	6%	26%	13%
16h	156,6	19,9	24,8	0,5	-0,6	42	0,6	4,72	20%	35%	7%	30%	9%
17h	158,8	17,8	23,5	0,5	-0,6	54	0,7	4,42	24%	31%	7%	26%	12%
18h	149,0	20,2	24,9	0,5	-0,6	39	0,6	4,93	19%	35%	7%	29%	10%
19h	146,6	20,6	25,2	0,5	-0,6	42	0,6	4,97	18%	35%	8%	29%	10%
20h	145,1	19,1	23,4	0,5	-0,5	42	0,6	4,47	18%	35%	7%	28%	12%
minuit	146,5	22,5	26,9	0,5	-0,6	42	0,9	5,76	16%	35%	9%	31%	9%

Tableau B - 4 : Paramètres calculés pour les cycles de conduite le dimanche sur rue résidentielle

	Wh/km	AveSpeed	AveRunSpeed	Aveacc	AveDCC	Noacc	RMSquareacc	power	Tidle	Tacc	Tcruise	Tdcc	Tcreep
5h	135,0	26,0	29,8	0,4	-0,5	33	0,5	6,4	12%	36%	11%	31%	9%
6h	120,2	31,1	35,8	0,5	-0,6	29	0,8	8,5	13%	37%	9%	35%	6%
7h	137,0	21,1	32,2	0,5	-0,6	53	0,5	5,9	34%	28%	7%	24%	6%
8h	162,9	22,3	26,8	0,6	-0,7	30	0,8	5,6	17%	38%	6%	32%	7%
9h	141,4	21,8	26,0	0,5	-0,6	30	0,7	5,5	16%	31%	9%	30%	14%
10h	139,2	23,1	27,3	0,5	-0,5	46	0,8	5,9	15%	32%	8%	32%	13%
11h	152,3	20,9	25,7	0,5	-0,6	38	0,7	5,0	19%	36%	8%	28%	8%
12h	146,9	22,7	27,1	0,5	-0,5	47	0,5	5,6	16%	36%	8%	31%	9%
13h	146,5	22,8	26,9	0,6	-0,6	37	0,9	6,0	15%	36%	8%	31%	10%
14h	128,8	18,6	24,9	0,5	-0,6	51	0,7	5,1	25%	30%	6%	26%	12%
15h	161,5	16,3	23,3	0,5	-0,6	60	0,6	4,1	30%	29%	6%	23%	12%
16h	138,4	20,6	25,6	0,5	-0,6	39	0,8	5,2	20%	35%	7%	29%	8%
17h	139,7	21,6	26,6	0,5	-0,5	42	0,6	5,2	19%	35%	8%	30%	8%
18h	146,9	21,9	26,0	0,5	-0,5	37	0,6	5,4	16%	35%	9%	31%	10%
19h	129,5	23,8	28,5	0,5	-0,5	30	0,6	5,6	16%	34%	12%	29%	8%
20h	153,1	21,2	24,9	0,4	-0,5	36	0,5	4,8	15%	34%	10%	29%	12%
minuit	136,6	22,2	26,8	0,5	-0,5	51	0,6	5,3	17%	34%	11%	29%	8%

Tableau B - 5 : Paramètres calculés pour les cycles de conduite le lundi sur artère principale

	Wh/km	AveSpeed	AveRunSpeed	Aveacc	AveDCC	Noacc	RMSquareacc	power	Tidle	Tacc	Tcruise	Tdcc	Tcreep
5h	139,2	27,0	32,3	0,5	-0,6	39	0,8	7,6	17%	34%	9%	31%	9%
6h	142,7	24,4	29,1	0,6	-0,6	35	0,9	6,7	16%	35%	8%	32%	9%
7h	148,1	20,8	25,4	0,5	-0,5	39	0,6	5,1	18%	34%	8%	29%	11%
8h	157,2	16,5	21,3	0,4	-0,5	48	0,5	3,9	22%	30%	6%	24%	17%
9h	156,8	18,6	23,4	0,5	-0,5	43	0,6	4,6	21%	32%	7%	27%	14%
10h	142,6	19,1	23,6	0,5	-0,5	44	0,6	4,8	19%	32%	7%	27%	15%
11h	151,9	20,4	25,7	0,5	-0,5	38	0,5	5,1	21%	34%	7%	27%	11%
12h	152,0	20,2	25,6	0,5	-0,5	41	0,6	5,1	21%	34%	7%	27%	12%
13h	156,7	17,8	23,5	0,4	-0,5	36	0,6	4,6	25%	30%	6%	24%	15%
14h	157,5	19,4	23,8	0,5	-0,5	43	0,6	4,9	19%	33%	7%	28%	14%
15h	149,5	17,5	22,1	0,5	-0,5	41	0,7	4,4	21%	32%	6%	25%	16%
16h	168,9	17,3	21,9	0,4	-0,5	52	0,5	4,1	21%	32%	7%	25%	15%
17h	146,7	19,6	24,0	0,5	-0,5	40	0,6	4,9	18%	32%	7%	28%	15%
18h	141,6	21,3	26,4	0,5	-0,5	39	0,6	5,3	19%	34%	8%	28%	11%
19h	139,6	23,9	28,8	0,5	-0,6	34	0,6	6,2	17%	36%	8%	29%	9%
20h	149,5	23,9	28,8	0,5	-0,6	36	0,7	6,2	17%	35%	9%	29%	9%
minuit	158,4	28,1	33,1	0,6	-0,6	37	0,8	8,0	15%	36%	9%	33%	8%

Tableau B - 6 : Paramètres calculés pour les cycles de conduite le mercredi sur artère principale

	Wh/km	AveSpeed	AveRunSpeed	Aveacc	AveDCC	Noacc	RMSquareacc	power	Tidle	Tacc	Tcruise	Tdcc	Tcreep
5h	144,7	30,6	34,6	0,6	-0,6	25	0,8	9,0	12%	37%	10%	34%	8%
6h	151,8	27,2	33,7	0,6	-0,7	44	1,0	8,3	19%	36%	8%	31%	7%
7h	147,7	21,7	26,9	0,5	-0,6	41	0,7	5,6	19%	34%	7%	28%	10%
8h	169,5	16,6	21,4	0,4	-0,5	44	0,5	4,1	23%	30%	6%	24%	17%
9h	152,9	18,3	23,1	0,5	-0,5	44	0,6	4,7	20%	32%	6%	26%	14%
10h	152,7	18,4	23,9	0,5	-0,5	43	0,6	4,7	23%	32%	6%	25%	14%
11h	151,0	19,9	24,7	0,5	-0,5	40	0,6	5,1	20%	33%	7%	27%	18%
12h	150,8	16,4	21,0	0,4	-0,5	41	0,6	4,1	22%	30%	5%	24%	14%
13h	157,9	18,9	23,5	0,4	-0,5	44	0,5	4,6	19%	33%	7%	26%	15%
14h	162,2	18,8	23,7	0,5	-0,5	45	0,6	4,8	21%	33%	6%	26%	16%
15h	152,2	17,3	22,2	0,4	-0,5	48	0,5	4,3	22%	32%	5%	25%	18%
16h	172,9	16,2	20,9	0,4	-0,5	48	0,6	4,1	22%	30%	5%	25%	18%
17h	162,1	16,0	20,7	0,4	-0,5	50	0,6	4,0	23%	30%	5%	24%	15%
18h	164,8	18,7	23,3	0,4	-0,5	43	0,5	4,6	20%	33%	6%	26%	16%
19h	146,7	19,7	24,3	0,4	-0,5	42	0,5	5,0	19%	32%	7%	26%	10%
20h	141,7	23,6	28,1	0,5	-0,5	39	0,6	6,0	16%	36%	9%	29%	9%
minuit	144,5	24,6	31,1	0,5	-0,6	35	0,7	6,8	21%	33%	9%	29%	9%

Tableau B - 7 : Paramètres calculés pour le cycle de conduite le vendredi sur artère principale

	Wh/km	AveSpeed	AveRunSpeed	Aveacc	AveDCC	Noacc	RMSquareacc	power	Tidle	Tacc	Tcruise	Tdcc	Tcreep
5h	153,7	28,2	33,3	0,5	-0,6	44	0,7	810%	15%	36%	10%	30%	9%
6h	164,1	26,0	31,6	0,5	-0,6	31	0,7	719%	18%	35%	9%	31%	8%
7h	158,6	21,6	26,2	0,5	-0,5	43	0,7	545%	17%	34%	8%	30%	12%
8h	151,9	19,3	24,1	0,4	-0,5	48	0,5	489%	20%	33%	7%	26%	14%
9h	151,7	19,5	24,2	0,5	-0,5	41	0,6	488%	20%	33%	7%	27%	14%
10h	170,9	19,6	24,7	0,5	-0,5	44	0,6	505%	20%	33%	7%	25%	15%
11h	163,5	19,6	25,2	0,5	-0,6	39	0,6	511%	22%	33%	7%	26%	12%
12h	149,2	19,6	24,8	0,5	-0,6	43	0,6	503%	21%	34%	7%	26%	13%
13h	158,6	18,5	24,1	0,5	-0,6	38	0,7	484%	23%	31%	6%	26%	14%
14h	147,2	18,5	23,0	0,5	-0,5	42	0,6	473%	20%	32%	6%	26%	16%
15h	177,7	17,4	22,2	0,4	-0,5	41	0,5	428%	22%	31%	6%	24%	18%
16h	166,7	16,5	21,1	0,4	-0,5	49	0,4	408%	22%	29%	5%	23%	20%
17h	155,3	17,9	22,7	0,4	-0,5	42	0,6	447%	21%	31%	6%	25%	16%
18h	150,8	19,6	24,2	0,4	-0,5	40	0,6	492%	19%	33%	7%	26%	15%
19h	149,6	19,6	24,7	0,5	-0,6	42	0,6	499%	21%	33%	7%	26%	14%
20h	154,4	21,2	26,2	0,5	-0,6	40	0,6	540%	19%	34%	7%	28%	12%
minuit	134,8	26,0	31,2	0,5	-0,6	34	0,7	6,9	17%	36%	9%	31%	7%

Tableau B - 8 : Paramètres calculés pour le cycle de conduite le dimanche sur artère principale

	Wh/km	AveSpeed	AveRunSpeed	Aveacc	AveDCC	Noacc	RMSquareacc	power	Tidle	Tacc	Tcruise	Tdcc	Tcreep
5h	139,3	32,3	37,0	0,5	-0,6	42	0,8	9,9	13%	37%	10%	32%	8%
6h	142,4	27,3	31,7	0,5	-0,5	40	0,5	6,85	14%	36%	12%	31%	7%
7h	142,4	25,0	29,9	0,6	-0,6	35	0,7	6,80	16%	36%	8%	31%	8%
8h	145,7	26,4	30,7	0,5	-0,6	36	0,7	7,56	14%	37%	7%	31%	12%
9h	144,8	23,7	28,1	0,5	-0,6	31	0,7	6,47	16%	37%	8%	29%	11%
10h	144,1	22,9	28,3	0,5	-0,6	33	0,7	6,22	19%	35%	8%	28%	10%
11h	158,5	22,5	27,4	0,5	-0,6	33	0,7	5,89	18%	35%	9%	29%	9%
12h	164,4	18,0	22,2	0,4	-0,5	43	0,5	4,58	19%	31%	6%	25%	20%
13h	144,6	19,9	25,0	0,5	-0,6	39	0,6	4,96	20%	34%	7%	27%	11%
14h	154,9	19,0	23,5	0,4	-0,5	36	0,5	4,78	19%	33%	6%	26%	15%
15h	142,4	18,7	23,7	0,5	-0,5	54	0,6	4,84	21%	32%	6%	26%	15%
16h	135,5	20,2	24,8	0,5	-0,5	415	0,5	5,00	18%	34%	7%	28%	13%
17h	156,7	19,1	24,3	0,5	-0,5	47	0,6	4,84	21%	32%	7%	26%	13%
18h	147,9	22,0	26,7	0,5	-0,5	38	0,5	5,47	18%	35%	8%	28%	11%
19h	154,1	22,5	27,4	0,5	-0,5	39	0,6	5,69	18%	35%	8%	30%	9%
20h	140,3	23,9	29,2	0,5	-0,6	37	0,6	6,20	18%	35%	8%	30%	9%
minuit	151,7	21,7	25,8	0,5	-0,5	44	0,6	5,7	16%	35%	7%	29%	13%

Tableau B - 9 : Paramètres calculé pour le cycle de conduite le lundi sur autoroute

	Wh/km	AveSpeed	AveRunSpeed	Aveacc	AveDCC	Noacc	RMSquareacc	power	Tidle	Tacc	Tcruise	Tdcc	Tcreep
5h	169,5	83,1	87,0	0,5	-0,4	118	1,2	47,2	4%	35%	25%	35%	0%
6h	181,1	74,4	79,6	0,5	-0,5	146	1,3	40,9	6%	35%	23%	34%	1%
7h	168,9	71,3	76,3	0,5	-0,5	174	1,4	39,6	7%	37%	19%	35%	3%
8h	164,0	55,0	59,5	0,5	-0,5	179	1,0	27,6	7%	37%	17%	33%	5%
9h	171,0	60,5	65,6	0,5	-0,5	176	1,1	31,1	8%	36%	18%	33%	6%
10h	169,7	72,5	77,6	0,5	-0,5	128	1,1	40,8	7%	36%	20%	34%	3%
11h	166,5	78,3	83,7	0,5	-0,5	144	1,5	45,6	6%	36%	21%	35%	1%
12h	168,6	78,6	82,3	0,5	-0,5	128	1,0	44,3	5%	37%	23%	34%	1%
13h	162,1	77,4	82,0	0,5	-0,5	143	1,5	43,7	6%	36%	22%	34%	2%
14h	179,8	64,1	69,2	0,5	-0,5	149	1,4	32,8	7%	37%	20%	33%	3%
15h	156,7	53,6	56,4	0,5	-0,5	196	1,2	25,4	5%	40%	16%	35%	5%
16h	158,0	55,1	59,0	0,5	-0,5	200	1,0	26,5	7%	38%	16%	34%	6%
17h	170,2	50,2	54,2	0,4	-0,5	191	1,1	22,7	7%	37%	15%	32%	9%
18h	191,3	67,2	74,9	0,6	-0,6	162	2,1	37,4	10%	36%	18%	33%	3%
19h	189,6	81,0	88,1	0,6	-0,6	146	1,8	50,2	8%	35%	22%	33%	2%
20h	166,1	79,2	85,2	0,6	-0,6	137	1,4	46,3	7%	38%	19%	35%	1%
minuit	152,1	66,7	73,0	0,5	-0,5	70	1,2	32,7	9%	36%	21%	34%	1%

Tableau B - 10 : Paramètres calculés pour le cycle de conduite le mercredi sur autoroute

	Wh/km	AveSpeed	AveRunSpeed	Aveacc	AveDCC	Noacc	RMSquareacc	power	Tidle	Tacc	Tcruise	Tdcc	Tcreep
5h	179,5	87,6	95,8	0,6	-0,5	125	1,6	54,7	8%	34%	24%	33%	0%
6h	180,3	77,5	84,6	0,5	-0,5	140	1,6	44,5	8%	35%	21%	34%	1%
7h	163,5	71,7	77,6	0,5	-0,5	143	1,2	39,3	8%	36%	21%	33%	3%
8h	154,5	49,2	53,1	0,4	-0,5	194	1,1	22,6	7%	37%	16%	33%	7%
9h	184,3	70,2	75,4	0,5	-0,5	143	0,9	38,2	7%	37%	21%	33%	2%
10h	156,1	71,2	75,2	0,4	-0,4	115	0,8	38,6	5%	36%	22%	32%	5%
11h	195,1	75,1	80,4	0,5	-0,5	129	1,2	42,3	7%	37%	20%	34%	3%
12h	168,6	73,7	78,5	0,5	-0,5	144	1,1	41,5	6%	37%	19%	35%	3%
13h	181,6	73,3	77,2	0,5	-0,5	174	1,3	39,9	5%	37%	22%	34%	2%
14h	175,0	58,5	62,1	0,5	-0,5	178	1,3	28,9	6%	39%	18%	34%	3%
15h	148,4	46,0	49,1	0,4	-0,4	198	1,0	19,6	6%	37%	16%	33%	8%
16h	160,3	45,6	49,9	0,4	-0,5	217	1,1	20,9	9%	36%	14%	31%	10%
17h	152,6	45,4	48,9	0,4	-0,5	228	0,9	20,3	7%	37%	14%	32%	10%
18h	181,2	58,3	62,0	0,5	-0,5	188	1,1	29,7	6%	38%	16%	34%	6%
19h	163,8	73,7	80,0	0,5	-0,6	157	1,7	43,3	8%	36%	19%	34%	3%
20h	175,7	72,2	77,5	0,5	-0,5	149	1,5	39,5	7%	37%	20%	33%	2%
minuit	174,0	76,7	80,7	0,6	-0,6	129	1,6	43,6	5%	37%	19%	37%	2%

Tableau B - 11 : Paramètres calculés pour le cycle de conduite le vendredi sur autoroute

	Wh/km	AveSpeed	AveRunSpeed	Aveacc	AveDCC	Noacc	RMSquareacc	power	Tidle	Tacc	Tcruise	Tdcc	Tcreep
5h	177,5	88,0	93,9	0,5	-0,5	124	1,58	53,61	6%	35%	24%	35%	0%
6h	159,4	82,0	85,7	0,4	-0,4	123	1,23	45,21	4%	35%	26%	33%	1%
7h	159,7	72,4	77,9	0,5	-0,6	150	1,28	39,35	7%	39%	18%	36%	1%
8h	153,0	60,4	63,4	0,4	-0,4	170	0,71	29,66	5%	38%	19%	35%	4%
9h	162,2	67,5	72,0	0,5	-0,5	166	1,12	36,99	6%	37%	18%	34%	4%
10h	170,0	68,3	73,1	0,5	-0,5	151	1,21	38,16	7%	37%	18%	33%	5%
11h	176,4	74,1	79,9	0,5	-0,5	160	1,52	41,43	7%	35%	21%	33%	3%
12h	167,3	64,8	69,3	0,5	-0,5	164	1,38	35,56	6%	35%	20%	32%	6%
13h	178,9	61,6	66,4	0,5	-0,5	181	1,41	33,46	7%	37%	16%	34%	7%
14h	144,7	54,4	57,3	0,4	-0,5	177	0,77	25,22	5%	38%	17%	34%	6%
15h	178,8	45,7	48,3	0,4	-0,5	218	0,80	20,30	5%	39%	15%	34%	7%
16h	143,8	50,5	54,0	0,5	-0,5	214	1,21	23,35	7%	38%	16%	34%	6%
17h	162,7	55,4	58,9	0,5	-0,5	198	1,62	27,54	6%	38%	16%	34%	6%
18h	153,3	58,8	62,8	0,5	-0,5	192	1,17	30,60	6%	36%	17%	33%	8%
19h	159,4	67,2	73,5	0,5	-0,6	165	1,62	37,74	9%	37%	17%	33%	4%
20h	181,4	78,1	85,0	0,6	-0,6	155	1,84	45,67	8%	37%	21%	34%	1%
minuit	165,3	76,8	80,4	0,5	-0,5	141	0,99	41,24	4%	35%	24%	35%	1%

Tableau B - 12 : Paramètres calculés pour le cycle de conduite le dimanche sur autoroute

	Wh/km	AveSpeed	AveRunSpeed	Aveacc	AveDCC	Noacc	RMSquareacc	power	Tidle	Tacc	Tcruise	Tdcc	Tcreep
5h	165,5	89,3	94,2	0,5	-0,5	122	1,48	53,89	5%	34%	27%	34%	0%
6h	169,9	86,2	92,3	0,5	-0,5	123	1,69	51,91	7%	33%	26%	34%	0%
7h	174,8	86,5	91,2	0,5	-0,4	95	1,27	51,06	5%	32%	30%	32%	1%
8h	164,4	85,6	89,1	0,5	-0,4	96	0,97	50,12	4%	36%	24%	35%	1%
9h	164,2	86,9	90,9	0,5	-0,4	111	1,08	51,27	4,5%	34,3%	26,9%	34,1%	0,3%
10h	172,8	83,5	87,6	0,5	-0,5	124	1,13	49,44	5%	36%	23%	35%	1%
11h	168,6	79,4	84,7	0,5	-0,5	116	1,22	45,85	6%	35%	23%	33%	3%
12h	175,2	72,0	77,2	0,5	-0,5	148	1,38	39,02	7%	36%	20%	35%	2%
13h	178,5	82,3	86,8	0,5	-0,5	143	1,49	47,30	5%	37%	22%	35%	0%
14h	174,2	83,3	89,6	0,5	-0,5	131	1,37	50,32	7%	35%	24%	34%	1%
15h	165,9	73,1	80,2	0,5	-0,5	149	1,47	41,07	9%	35%	20%	34%	2%
16h	196,3	69,4	76,2	0,5	-0,6	168	1,53	38,85	9%	36%	19%	34%	2%
17h	188,0	69,3	75,2	0,5	-0,6	164	1,75	39,33	8%	37%	18%	33%	4%
18h	167,5	75,0	81,0	0,5	-0,5	150	1,85	42,93	7%	37%	19%	34%	3%
19h	177,8	74,6	81,5	0,6	-0,6	151	1,71	42,74	8%	37%	19%	35%	1%
20h	168,0	80,5	84,9	0,5	-0,5	132	1,40	45,81	5%	35%	25%	34%	1%
minuit	155,0	74,9	80,7	0,5	-0,5	152	1,18	41,20	7%	37%	19%	36%	1%